

**Auswahl von Fertigungskonzepten für kundenspezifische
Kunststoff-Metall-Bauteile durch ganzheitliche Modellbetrachtung**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Sascha Pohl
aus
Schwerte

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Schramm
Tag der mündlichen Prüfung: 02.08.2012

Vorwort / Danksagung

Bei der Erstellung der Dissertation standen für mich das Studieren aktueller Literatur von Technologien und Methoden, in Kombination mit meinen persönlichen Produkt- und Projekterfahrungen aus der Industrie, die resultierende Transformation und Anwendbarkeit der Erkenntnisse im Vordergrund.

Einen besonderen Dank möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. J. Wortberg vom Institut für Produkt Engineering der Universität Duisburg-Essen und Herrn Professor Dr.-Ing. E. Schwab von der Fachhochschule Südwestfalen aussprechen, die mir das Vertrauen geschenkt haben, dieses Vorhaben neben meiner beruflichen Tätigkeit erfolgreich durchzuführen. Die anregenden Diskussionen und die Unterstützung bei der Umsetzung sowie die gewährten Freiräume haben das Gelingen dieser Arbeit ermöglicht.

Zudem bedanke ich mich bei der Prüfungskommission und bei Professor Dr.-Ing. D. Schramm für die Übernahme des Korreferats.

Weiterhin danke ich dem Unternehmen Inovon GmbH & Co. KG für die Betreuungsmöglichkeit von mehreren Diplomarbeiten sowie den Mitarbeitern des Unternehmens für den Erfahrungs- und Wissensaustausch.

Ein herzlicher Dank gilt Thomas Ohnemus, Ralf Rechberger, Armin Marto und meinem Bruder Marcus Pohl für die kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Einen liebevollen Dank spreche ich meiner Frau und meinen beiden Kindern aus, ohne deren Verständnis, Geduld und Verzicht diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

August 2012

Sascha Pohl



Inhaltsverzeichnis

Vorwort / Danksagung	I
Inhaltsverzeichnis	III
Abkürzungen und Formelzeichen.....	V
1 Einführung.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Wichtige Begriffe	3
1.3 Problemstellung und Zielsetzung.....	5
2 Stand der Technik	7
2.1 Insert- und Outserttechnik	7
2.2 Kunststoff-Metall-Bauteile in der Kontakt- und Verbindungstechnik	8
2.3 Fertigungssysteme für Kunststoff-Metall-Bauteile	11
2.3.1 Werkstückträger-Wechseltisch.....	12
2.3.2 Werkstückträger-Umlaufsystem	13
2.3.3 Reel-to-Reel System.....	14
2.3.4 Reel-to-Line System	15
2.3.5 Tisch-System	16
2.3.6 Hybrid-Werkzeug System	17
2.3.7 Prüf- und Verpacksysteme.....	18
3 Planung von Fertigungskonzepten	20
3.1 Planungszeitpunkt und Auswahl von Fertigungskonzepten	20
3.2 Möglichkeiten zur Gestaltung der Prozessabfolgen von Fertigungssystemen.....	22
3.2.1 Prozessabfolge	22
3.2.2 Simulation von Fertigungssystemen	24
3.3 Entscheidungseinflüsse bei der Planung von Automatisierungsmaßnahmen.....	25
3.3.1 Produktstückzahlen und Flexibilität von Fertigungssystemen.....	25
3.3.2 Produkt- und Fertigungstoleranzen	26
3.3.3 Risikobewertung von Mensch und Maschine	27
3.3.4 Verfügbarkeiten von Fertigungssystemen	28
3.3.5 Produktverhalten nach dem Spritzgießprozess	29
3.3.6 Fazit zu Prozessabfolgen und Automatisierungsmaßnahmen.....	34
4 Bewertung von Fertigungskonzepten	36
4.1 Effektivitätsbetrachtung mittels Net Equipment Effectiveness	37
4.2 Prozessbetrachtung mittels Wertstromdesign	40
4.3 Kostenbetrachtung von Fertigungskonzepten.....	50
4.3.1 Wertstromdesign eines Fallbeispiels	50

4.3.2	Maschinen	51
4.3.3	Personal	60
4.3.4	Material	65
4.3.5	Losgröße	72
4.3.6	Bestände	73
4.3.7	Rüsten	79
4.3.8	Werkzeuge	83
4.3.9	Modellergebnis des Fallbeispiels	86
4.3.10	Zusammenhänge, Abhängigkeiten und Auswirkungen der Einflussparameter	87
5	Fertigungsszenarien	96
5.1	Optimieren der Losgröße	96
5.2	Technische Erweiterungen von Fertigungssystemen	97
5.3	Vergleich von Fertigungskonzepten	99
6	Kritische Reflektierung	104
6.1	Fertigungskonzepte nach der Toyota-Philosophie	104
6.2	Modell	106
7	Fazit und Ausblick	109
8	Zusammenfassung	113
9	Summary	115
10	Anhang	117
11	Literaturverzeichnis	122
12	Curriculum Vitae	137

Abkürzungen und Formelzeichen

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
Au	Gold
B	Bediener
CAD	Computer Aided Design
CAR	Center of Automotive Research
Cu	Kupfer
CuSn	Kupfer-Zinn-Legierung
DLZ	Durchlaufzeit
Δt	Zeitdifferenz
dm	Dezimeter
E-Modul	Elastizitätsmodul
ERP	Enterprise Resource Planning
EZZ	Effektive Zykluszeit
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FS	Fertigungssystem
GAE	Gesamtanlageneffektivität
GF	Glasfaser
g	Gramm
h	Stunden
IMK	Institut für Makroökonomie und Konjunkturforschung
IW	Institut der deutschen Wirtschaft
I.O.	In Ordnung
K	Kelvin
KFZ	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
kN	Kilonewton
KWh	Kilowattstunde
L	Leistungsverluste
LED	Light Emitting Diode
LCP	Liquid-Crystal-Polymer
LD	Lebensdauer
LGZ	Losgrößenzeit
M	Maschine
Mio.	Millionen
m	Meter
mm	Millimeter
N	Newton
NEE	Net Equipment Effectiveness
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OEM	Original Equipment Manufacturers

OT	Oberteil (Werkzeug)
p	Druck
PBT	Polybutylenterephthalat
Q	Qualitätsverluste
Q-Faktor	Qualitäts-Faktor
QR	Qualitätsverluste Rüsten
RZ	Rüstzeit
s	Sekunde
SMED	Single Minute Exchange of Die
T	Temperatur
TEEP	Total Effective Equipment Productivity
TPM	Total Productive Maintenance
TPS	Toyota Produktionssystem
UT	Unterteil (Werkzeug)
V	Verfügbarkeitsverluste
v	spezifisches Volumen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WBW	Wiederbeschaffungswert
WKZ	Werkzeug
WT	Werkstückträger
µm	Mikrometer
ZVEI	Zentralverband für Elektrotechnik- und Elektronikindustrie
ZZ	Zykluszeit

1 Einführung

1.1 Motivation

Kunststoff-Metall-Bauteile sind in vielen Branchen wie Elektronik/Elektrotechnik, Automotive, Medizintechnik sowie Kommunikations-, Hausgeräte- und Energietechnik sehr gefragt. „Experten beziffern, dass inzwischen über 60% aller Metallteile mit Kunststoff verbunden werden“ [Spi10].

Die Kombination dieser beiden Materialien bietet die Möglichkeit für innovative Produkte (vgl. [Bon02, Ehr04, Erh08, Kir07]).

Der Markt für Autoelektrik soll nach einer Studie von Mercer Management Consulting von 2006 jährlich um fast 6% wachsen. Eine Studie von Roland Berger zusammen mit BASF von 2007 prognostiziert für das Jahr 2015 einen Elektrik- und Elektronikanteil von etwa 30% des Fahrzeugwertes [SBR09].

Durch die rasante Entwicklung der Elektronik u.a. in der Automotivebranche bieten sich in den Bereichen der Kontakt- und Verbindungstechnologie in zahlreichen Anwendungen hohe Potentiale. Diese führen für die Unternehmen zu einem global, zunehmenden Wettbewerb. Zu einem wichtigen Thema für die Industrie sind vor allem internationale, konkurrenzfähige Fertigungsprozesse und Produktionsstandorte geworden, in technischer sowie in wirtschaftlicher Hinsicht.

„Einer der wichtigen Erfolgsfaktoren ... ist der Ansatz, komplexe Bauteile mit hoher Funktionsintegration schnell und kostengünstig zu entwickeln und zu produzieren“ [MHP09].

Ziel dieser Produkte muss es sein, neue, platzsparende sowie gewichtsreduzierte Geometrien und Funktionen mit den Vorteilen beider Werkstoffe zu vereinen.

Durch die Inserttechnik können mehrere Teile miteinander in einem Fertigungszyklus verbunden und somit kostengünstig hergestellt werden (vgl. [JM04, SG04, SB06]).

Die Inserttechnik integriert Fertigungstechnologien und schafft damit Attraktivität, Montageschritte zu substituieren und erhöht dadurch die wirtschaftlichen Anreize für Kunststoff-Metall-Bauteile. Je mehr Fertigungsschritte in einem Unternehmen vollzogen werden können, sofern technische Kompetenz und marktgerechte Umsetzungsmöglichkeiten vorhanden sind, desto kostengünstiger wird in der Regel das Produkt für den Endkunden und umso höher der Gewinn des produzierenden Unternehmens.

Speziell bei Bauteilen für den mechatronischen Einsatz wird das Metall, auch Insert genannt, als elektrischer Leiter und der Kunststoffkörper als elektrischer Isolator verwendet.

Die als Leiterbahnen genutzten Inserts werden zu Gehäusen umspritzt oder zu Vorumspritzlingen, Stecker oder Leiterplattenverbinder verarbeitet. Diese finden Anwendung in Steuergeräten oder anderen mechatronischen Baugruppen (siehe Abbildung 1-1).

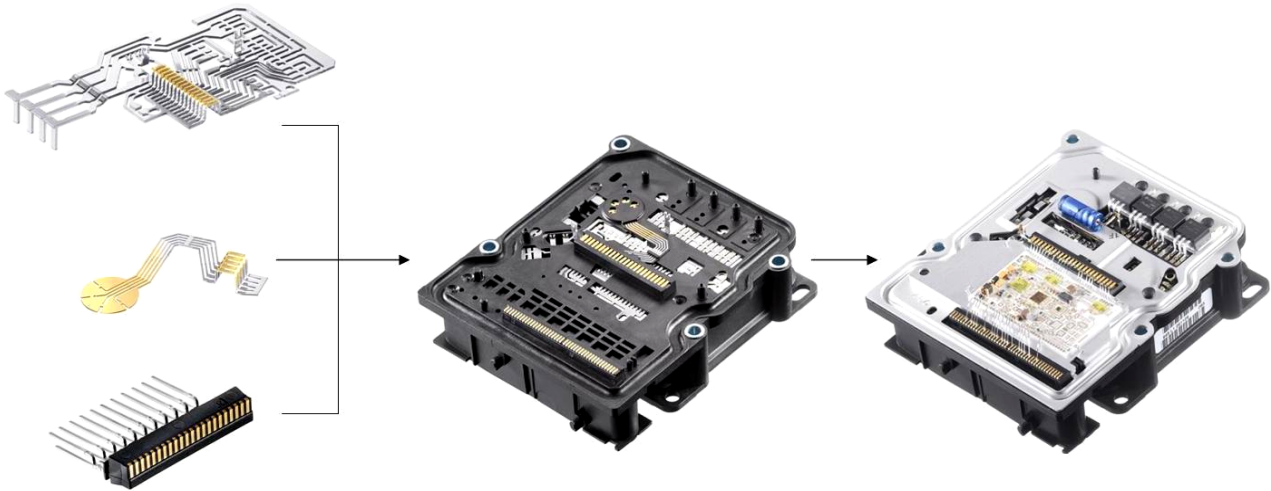


Abbildung 1-1: Kunststoff-Metall-Bauteile (Quelle: Inovant)

Die ADAC Pannenstatistik von 2008 zeigt auch die Herausforderungen für diese Bauteile auf. Mit 40% ist die KFZ-Elektrik die Hauptursache für Pannen und Liegenbleiben [N.N.09a].

Qualität im Vorfeld wirtschaftlich und zeitlich zu planen, ist eine der wichtigsten Grundlagen für neue Produkte. Somit wächst der Anspruch an die Endprodukte und folglich auch an deren Baugruppen und Einzelteile. Der steigende Automatisierungsgrad bei der Weiterverarbeitung der Einzelteile und Baugruppen erzwingt immer geringere Streuungen. Die zunehmenden standardisierten 100%-Prüfungen zur Erreichung von Null-Fehler-Strategien machen kritische Bauteilabweichungen schnell transparent.

Immer kürzer werdende Entwicklungszeiten drängen Unternehmen dazu, bereits im Vorfeld Fehlerquellen zu vermeiden und Rekursionen am Produkt und dem Herstellprozess auszuschließen. Der steigende Preisdruck durch die zunehmende Anzahl internationaler Anbieter macht es für nationale Unternehmen erforderlich, nah an den technischen Grenzen Teilepreise zu kalkulieren. Ein vertraglich bindendes Angebot legt u.a. die wirtschaftlichen und qualitativen Bedingungen vom Lieferanten zum Auftraggeber fest. Mit der Angebotsabgabe sind diese Bedingungen fixiert. Treten bei der Realisierung höhere Kosten ein als geplant, wie z.B. teurere Werkzeugkorrekturen oder Erweiterungen an Fertigungskonzepten, müssen diese vom Lieferanten selber finanziert werden.

Daher ist es wichtig, die Einflüsse auf die Produktqualität zu kennen und den technischen und finanziellen Risiken im Vorfeld entgegensteuern zu können, aber trotzdem marktgerechte Teilepreise anzubieten.

Wie gelingt es einem Unternehmen, bei der zunehmenden Anzahl an kundenspezifischen, individuellen Produkten in immer kürzerer Zeit marktgerechte Fertigungskonzepte auszuarbeiten, um Fertigungsaufträge zu erhalten und dabei auch wirtschaftlich zu agieren?

Die Produktvielfalt ist sehr groß, kaum ein Produkt ähnelt in all seinen Facetten dem anderen: Unterschiedliche Rohstoffe, Geometrien, Oberflächen, Funktionen, Anlieferzustände, Verpackungsarten oder Anwendungsgebiete, aber auch unterschiedliche Stückzahlenbedarfe, Produktlebenszeiten, Produktionsstandorte, Qualitäts- und Reinheitsanforderungen machen eine individuelle Betrachtung notwendig.

Für sehr detaillierte Ausarbeitungen im Anfragestadium neuer Produkte fehlt es den Unternehmen an Zeit bzw. an Kapazität. Gewöhnlich erhalten die Hersteller von Kunststoff-Metall-Bauteilen nach Überreichen einer Produktzeichnung und den zugehörigen Rahmenbedingungen (z.B. Stückzahlscenario, Produktlebenszeit, erweiterte Qualitätsanforderungen an das Produkt, maximale Projektierungszeit bis zum Serienstart, etc.) nur wenige Arbeitstage bis zur Angebotsabgabe.

Der Lieferant muss für das Angebot ein Fertigungskonzept ausarbeiten. Beginnend bei den Anfragen für Rohmaterialien für Metalle und Kunststoffe über die Planung der internen und ggfs. externen Fertigungsstufen inkl. der notwendigen Maschinen, Peripherien, Werkzeuge und Bedienpersonal bis hin zu den qualitätsrelevanten und logistischen Themen.

Viele Produkte sind bei Auftragsanfrage auch von der Designentwicklung noch nicht vollständig abgeschlossen, so dass für ein Produkt zeitlich versetzt mehrere Angebote ausgearbeitet werden müssen. Unterschiedliche Fertigungskonzepte für ein Produkt parallel auszuarbeiten und miteinander zu vergleichen ist bereits für viele Unternehmen eine kapazitive Herausforderung. Daher ist es wichtig, die bedeutsamsten Kostenfaktoren der gesamten Prozesskette zu kennen, ihre Einflussgröße zu verstehen und schlussendlich auch beeinflussen zu können.

1.2 Wichtige Begriffe

Um die folgenden Begriffe besser einordnen und voneinander abgrenzen zu können, werden diese in Abbildung 1-2 dargestellt und anschließend erklärt.

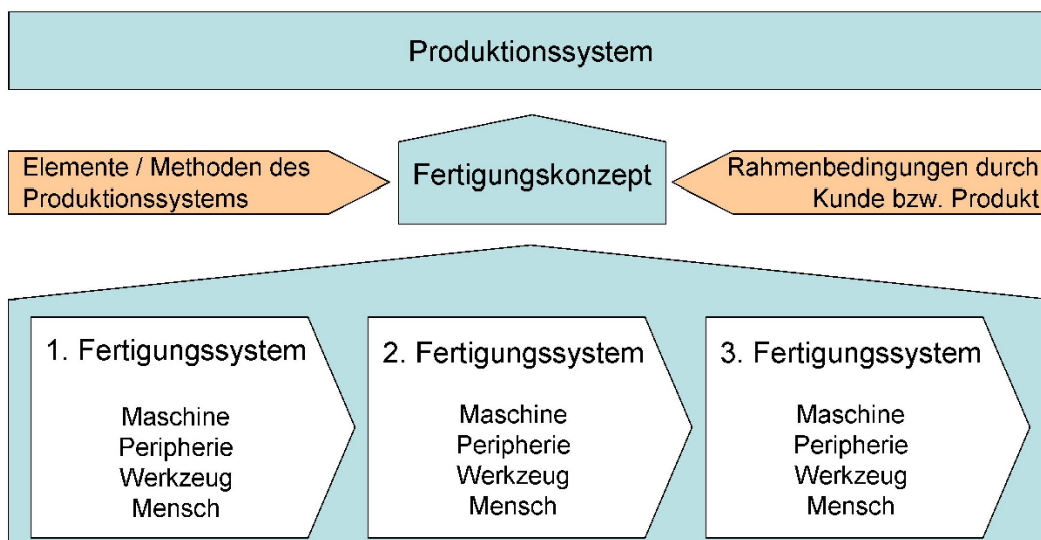


Abbildung 1-2: Begriffsüberblick

Ein Fertigungssystem ist die kleinste Einheit einer Kombination von Betriebsmittel und Arbeitskraft für Produktionszwecke [Dan01]. Das Fertigungssystem beinhaltet hier die Maschine inkl. der Peripherie, das Werkzeug, sowie die bedienende Person.

Zur Produktherstellung ist eine Kombination von mehreren Fertigungssystemen möglich bzw. nötig. Für Kunststoff-Metall-Bauteile sind vor dem Fertigungssystem für den Spritzgießprozess in

der Regel noch ein oder mehrere Fertigungssysteme notwendig, um die Inserts aus einem Halbzeug zu stanzen und sie ggfs. beim Galvanisieren mit der benötigten Funktionsoberfläche zu beschichten.

Ebenso können nach dem Spritzgießprozess noch weitere Fertigungssysteme möglich sein (z.B. für einen weiteren Stanzprozess). Ähnliche verwandte Begriffe eines Fertigungssystems haben im Folgenden die gleiche Bedeutung: Fertigungsprozess, -anlage, -stufe, -schritt oder -linie bzw. Produktionsprozess, -anlage, -stufe, -schritt oder -linie.

Der übergeordnete Begriff von allen am Herstellungsprozess beteiligten Fertigungssystemen ist das Fertigungskonzept. In einem Fertigungskonzept sind alle Fertigungssysteme integriert und es bezieht zusätzlich Einflüsse durch die Elemente (oder Methoden) des Produktionssystems sowie die Rahmenbedingungen des Kunden bzw. des Produktes mit ein.

Übergreifend umfasst ein Produktionssystem „alle Elemente und Relationen zwischen den Elementen, die zur vollständigen Erstellung eines Produktes erforderlich sind. Als Funktion eines Produktionssystems ist die Erfüllung einer Produktionsaufgabe anzusehen, welche durch Art, Menge und Reihenfolge der zu erstellenden Sachleistungen charakterisiert werden kann“ [Hoe07]. Ein Produktionssystem ist ein dynamisches Netzwerk von Gestaltungsprinzipien, Elementen/Methoden und Werkzeugen zur Planung, zum Betrieb und zur permanenten Verbesserung von Produktionsprozessen [Her10].

Eines der bekanntesten Produktionssysteme ist z.B. das des Automobilherstellers Toyota. Die hier eingehenden Elemente aus dem Produktionssystem in das Fertigungskonzept sind die Effektivitätsbewertung jedes einzelnen Fertigungssystems sowie eine Wertstrombetrachtung vom Wareneingang über die Verarbeitung bis zum Versand der Fertigteile zum Kunden.

Dem Produkt zugehörige bzw. vom Kunden geforderte Rahmenbedingungen hinsichtlich Stückzahl und Produktlebenszeit sind wichtige Variablen, die bei der Ausarbeitung von Fertigungskonzepten mit beachtet werden sollten.

In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Definitionen für Modelle, die sich je nach Anwendungsbereich und Detaillierungsgrad unterscheiden. Eine allgemeine technische Definition kann wie folgt verstanden werden:

Ein Modell ist ein abstraktes bzw. immaterielles, geschaffenes Gebilde, um das Original mit ausgewählten Eigenschaften für einen bestimmten Zweck zu repräsentieren [VWB09].

Aus betriebswirtschaftlicher Sichtweise kann ein Modell auf ein gesamtes Unternehmen mit seinem Produktionssystem und dessen zugehörigen Fertigungsprozessen angewendet werden. „Ein Modell stellt eine vereinfachte Abbildung der Realität dar. Solche vereinfachten Abbildungen sind zur Erkenntnisgewinnung ... notwendig, da die betriebliche Realität von einem so hohen Komplexitätsgrad ist, dass ihre vollständige Erfassung in allen Bestandteilen und Beziehungen nicht geleistet werden kann“ [PBS05].

1.3 Problemstellung und Zielsetzung

Die zunehmende Anzahl an neuen Produkten führt zum steigenden Wettbewerb mit ihren immer kürzer werdenden Produktentwicklungszeiten und die Hersteller haben den Anspruch, möglichst zu jedem Entwicklungsdesign und -zeitpunkt den exakten Serienpreis im Vorfeld beziffern zu können.

Allgemein bekannt ist, dass 70% der Produktkosten bereits in der Entwicklungs- und Konstruktionsphase festgelegt werden (vgl. [LZ04, Ste08]). Jedoch sind die Produktkosten durch ein Angebot vertraglich im Vorfeld schon vereinbart. Somit besteht die Notwendigkeit, die Produktkosten bereits während der Angebotsphase möglichst exakt abschätzen zu können.

Eine umfassende technische und wirtschaftliche Ausarbeitung von mehrstufigen Fertigungssystemen erfordert hohen Aufwand. Dabei liegen aber in sehr frühen Stadien der Produktentwicklung oftmals noch lückenhafte Informationen zur gesamten Auftragsabwicklung vor. Folglich werden in der heutigen Handhabung der Kostenkalkulation Fertigungssysteme und -konzepte nach unternehmensspezifischen Richtlinien bzw. Vorgaben ausgewählt und bewertet. Dies führt zwar zu einer einheitlichen Vorgehensweise eines Unternehmens, jedoch kann dadurch das Berechnungsergebnis für ein spezielles Produkt im Hinblick auf die Kosten nicht genau ermittelt und somit auch nicht das kostengünstigste Fertigungskonzept ausgewählt werden.

Demzufolge riskiert ein Unternehmen zu hohe oder zu niedrige Kosten für ein Produkt. Mit zu hohen Kosten für ein Produkt sinken für das Unternehmen die Chancen, den Projektauftrag zu bekommen. Sind die Kosten zu niedrig kalkuliert und bei der Realisierung dann höher als ursprünglich erwartet, muss das Unternehmen den Mehraufwand selber finanzieren, weil die Kosten bereits vertraglich mit dem Auftraggeber vereinbart sind.

Weiterhin gibt es mehrere Möglichkeiten für die Auslegung eines Fertigungsprozesses für Kunststoff-Metall-Bauteile. Wenn die Geometrie des Produktes es zulässt, können einzelne oder zusammenhängende Fertigungssysteme eingesetzt werden. Je nach Auswahl gibt es unterschiedliche Auswirkungen auf die Kosten des Fertigungskonzeptes, obwohl eventuell die gleichen Maschinen und Werkzeuge in den Fertigungssystemen eingesetzt werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Auswahl von Fertigungskonzepten für kundenspezifische Kunststoff-Metall-Bauteile durch eine ganzheitliche Modellbetrachtung.

Auf der Grundlage der Produktlebenszeit (im Automobilbereich sind dies ca. sieben Jahre [NKW10]) und der Stückzahl soll das Modell die wichtigsten Einflussfaktoren zur Kostenkalkulation beinhalten, um so schnell und mit angepasstem Aufwand mehrere Fertigungskonzepte miteinander vergleichen und das kostengünstigste Fertigungskonzept auswählen zu können. Ebenfalls muss das Modell ein kostenseitiges Reflektieren der Auswirkungen von technischen Modifikationen an Fertigungskonzepten ermöglichen.

Es ist erforderlich, dass dieses Modell mit möglichst wenigen technischen Variablen in der Lage ist, explizit für ein Produkt mit auftrags- und produktspezifischen Rahmenbedingungen eine Kostenbewertung durchzuführen. Die Variablen werden bei der Planung der unterschiedlichen Fertigungskonzepte ausgearbeitet. Die notwendigen Basisdaten für die Kostenbewertung von Fertigungssystemen liefern u.a. die Anschaffungskosten der auf dem Markt befindlichen Maschinen und die technischen Erweiterungsmöglichkeiten hinsichtlich der Automatisierungs-

maßnahmen an Peripherie und Prüftechnik. Jedes Fertigungssystem hat aber auch die dazugehörigen Produktionsgeschwindigkeiten, Kosten der Werkzeuge und das notwendige Bedienpersonal mit einzubeziehen.

Darauf aufbauend sollen die Basisdaten der Fertigungssysteme mit ausgewählten Elementen des Produktionssystems auf Effektivität und mittels Wertstromdesign bewertet werden können.

Das Modell zur Kostenkalkulation von Fertigungskonzepten muss eine Darstellung hinsichtlich Maschinen-, Personal-, Material-, Rüst-, Bestands- und Werkzeugkosten ermöglichen, um die Konzepte auch an den entscheidenden Stellen beeinflussen und optimieren zu können.

2 Stand der Technik

2.1 Insert- und Outserttechnik

Die Insert- und Outserttechnik sind Spritzgießsondervverfahren mit denen sich kombinierte Materialien, wie Kunststoff-Metall-Bauteile z.B. in Abbildung 2-1, durch Verfahrensintegration herstellen lassen [EHE08].

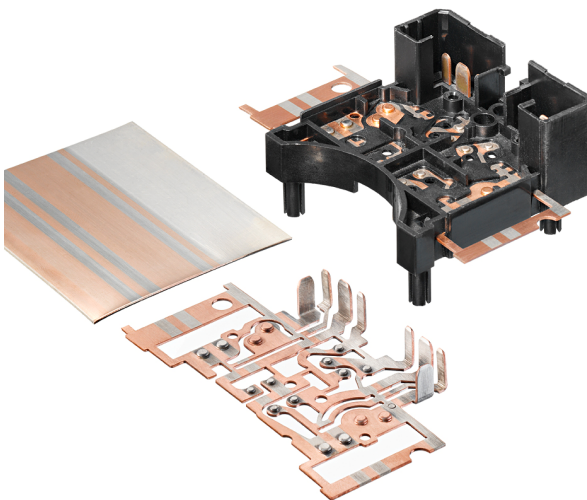


Abbildung 2-1: Halbzeug, gestanzt, gebogen und mittels Inserttechnik umspritzt (Quelle: Inovan)

Inserts oder Outserts sind bereits gefertigte Metallteile, oft auch Einlegeteile genannt, die in das Spritzgießwerkzeug eingelegt und umspritzt werden.

Bei der Inserttechnik überwiegt das Kunststoffteil im Gewicht und Volumen und bildet den strukturellen Zusammenhalt. Wird der Kunststoff an einen im Verhältnis relativ großen Metallträger an- bzw. eingespritzt, so spricht man von der Outserttechnik (vgl. [BBO07, Gas07, KR03, MRA09, Sch99, WH08]). In diesem Fall können auch mehrere kleine Kunststoffteile in einem Metallträger integriert werden.

Im Folgenden wird nicht weiter zwischen Inserts und Outserts unterschieden und ausschließlich der Begriff Insert bzw. Einlegeteil verwendet.

Inserts können manuell von Hand oder durch eine Automatisierung mittels Handlingsgeräten in die Spritzkavität eingelegt werden. Im Vergleich zum Standardspritzgießen ergeben sich bei diesem Fertigungsverfahren erhöhte Kosten für Peripherie sowie (abhängig vom Fertigungssystem) auch verlängerte Zykluszeiten und somit erhöhte Prozesskosten [N.N.07].

Die Fixierung der Inserts in der Spritzgießkavität ist notwendig (vgl. [SK04, CT02]), damit sie durch die anströmende Kunststoffschmelze nicht die Position verändern. An Inserts treten Haltestege und die Steckerpins aus der Kavität bzw. aus dem Kunststoffkörper aus. Diese Bereiche sind Fixierungen und gleichzeitig Dichtzonen.

Der Bereich der Dichtzone entspricht einer Spielpassung und muss das Einlegen des Inserts in die Kavität ermöglichen. Ist das Spiel zwischen Insert und Kavität zu groß, so kommt es zu ungewünschten Überspritzungen (Kunststoffgrat, umgangssprachlich als „Schwimmhäute“

bezeichnet). Für Kunststoffe mit einer niedrigen Viskosität, also einer sehr guten Fließfähigkeit, wie z.B. Liquid-Crystal-Polymere (kurz „LCP“), sind hier sehr hohe Ansprüche an die Kontur von Insert und Spritzkavität sowie eine reproduzierbare Einlegesystematik notwendig.

Sind Leiterbahnen über eine längere Distanz im Kunststoff eingebettet, sollten diese nicht nur am Ein- und Austritt sondern zusätzlich mit Abstützstiften entlang des Leiterbahnverlaufs im Kunststoff fixiert bzw. abgestützt werden.

Einlegeteile stellen beim Einspritzvorgang eine Fließbehinderung der voraneilenden Kunststoffschmelze dar, was beim Umströmen eines Inserts die Entstehung von Bindenähten begünstigt. Bindenähte stellen eine Schwächung der Bauteilfestigkeit dar, an denen das Material unter Belastung schnell nachgeben und reißen kann [KPP06].

Am Insert steigt die Abkühlgeschwindigkeit des Kunststoffs, was zu zusätzlichen unterschiedlichen Schwindungen und Eigenspannungen im fertigen Bauteil führen kann (vgl. [KHL04, MBL95, MMM07]).

Eigenspannungen sind innere Spannungen, die in den Teilen ohne Einwirken äußerer Kräfte vorhanden sind. Die Massetemperatur hat nur einen geringen Einfluss auf die Eigenspannungen. Dafür führen höhere Werkzeugoberflächentemperaturen zu geringeren Abkühlgeschwindigkeiten mit niedrigeren Eigenspannungen [DEE05].

Zur Reduzierung der Eigenspannungen im Kunststoff-Metall-Bauteil wird empfohlen, die Inserts vorgewärmt in das Spritzgießwerkzeug einzulegen, damit in der Kavität möglichst gleiche Temperaturbedingungen vorherrschen [Ben96].

2.2 Kunststoff-Metall-Bauteile in der Kontakt- und Verbindungstechnik

Klassische Produkte für Kunststoff-Metall-Bauteile sind Stecker, Steckverbinder, Vorumspritzlinge, Leiterplattenverbinder oder umspritzte Gehäuse, welche anschließend in mechatronischen Bauteilen Einsatz finden, wie z.B. Sensorgehäusen oder Steuergeräten (siehe Abbildung 2-2).



Abbildung 2-2: Sensorgehäuse (Foto: Bosch)

Die geplanten bzw. erwarteten Abrufzahlen können von Produkt zu Produkt sehr stark variieren, hier sind Stückzahlen von wenigen hundert bis zu mehreren Millionen Teilen pro Jahr möglich. Gewöhnlich beträgt branchenübergreifend der Produktlebenszyklus bis zu 15 Jahre oder länger.

Vorrangig werden als Grundmaterialien legierte Stähle, Kupfer und Kupferlegierungen eingesetzt, abhängig von den gewünschten mechanischen, elektrischen und anderen funktionalen Eigenschaften des Bauteiles. Bei den Kunststoffen beschränkt sich diese Arbeit auf Thermoplaste. Betrachtet man die allgemeinen Kennwerte der typischen Metalle und thermoplastischen Kunststoffe, so werden einige Unterschiede deutlich. In Tabelle 2-1 sind exemplarisch eine Kupfer-Zinn-Legierung [N.N.05] und Polybutylenterephthalat (unverstärkt und mit 30% Glasfaser) [BBO07] gegenübergestellt.

Material	E-Modul [kN/mm ²]	Dichte [kg/dm ³]	Längenausdehnungs- koeffizient [10 ⁻⁶ /K]
CuSn6	102-118	8,82	18
PBT unverstärkt	2,5-2,8	1,30-1,32	80-100
PBT-GF30	9,5-11	1,52-1,55	30-45

Tabelle 2-1: Kennwerte von ausgewählten Materialien

Die Legierung CuSn6 ist wesentlich steifer als die beiden Thermoplaste. Allerdings hängen die Kennwerte vom Materialquerschnitt ab. Beim Spritzgießen mittels Inserttechnik sind die Einleger der einseitig anströmenden Kunststoffschmelze sowie einem Spritzdruck von mehreren 100 bar ausgesetzt, welchen auch filigrane Einleger mit sehr dünnen und schmalen Leiterbahnen standhalten müssen.

Weiterhin ist CuSn6 durch seine höhere Dichte bei gleichem Volumen schwerer als PBT und PBT-GF30. Dieser Gewichtsunterschied ist für diese Art von Produkten weniger entscheidend. Es gibt aber Produkte (mit anderen Einsatzgebieten), bei denen beim Ersetzen von Metall durch Kunststoff der Gewichtsvorteil eine große Rolle spielt.

Der Längenausdehnungskoeffizient der beiden Thermoplaste ist größer als bei der Kupfer-Zinn-Legierung. Thermoplaste dehnen sich bei Erwärmung deutlich stärker aus. Dies sollte bei der Planung von Produkten, Auslegung von Werkzeugen und Fertigungsprozessen berücksichtigt werden. Durch eine Füllung der Kunststoffe mit Verstärkungsstoffen wird dieser Effekt vermindert [Mic06]. Der Längenausdehnungskoeffizient ist durch den Glasfaseranteil bei PBT-GF30 niedriger als bei unverstärktem PBT.

Diese Arbeit bezieht sich vorrangig auf kundenspezifische Bauteile aus der Automobilbranche. Kundenspezifisch bedeutet, dass der Auftraggeber ein neues und individuelles Produkt unter bestimmten qualitativen sowie quantitativen Gesichtspunkten vom Markt beziehen möchte.

Allgemeine Daten zu den Kunststoff-Metall-Bauteilen sind in Tabelle 2-2 beispielhaft zusammengestellt und lassen eine Beschreibung vieler Produkte auf dem Markt zu. Gleichzeitig dienen die Werte für diese Arbeit als Abgrenzung zu anderen Produkten.

Die Bandbreiten für die Abmaße (Breite, Höhe, Tiefe), die Metalldicke des Halbzeugs, die Spritzgewichte und die galvanischen Schichtdicken zeigen die große Produktvielfalt auf.

Abmaße [mm]	Metalldicke [mm]	Spritzgewichte [g]	Galvanische Schichtdicken [µm]	Positionstoleranzen Kontaktpins [mm]
5-150	0,1-2	2-50	0,1-8	0,2-0,3

Tabelle 2-2: Allgemeine Daten zu Kunststoff-Metall-Bauteilen

Viele Inserts werden vor dem Spritzgießen aus funktionalen Gründen entfettet und mit einer galvanischen Oberfläche veredelt. Hier kommen oft Metalle wie Gold, Silber, Zinn oder Nickel als Einfach- oder Multilayer mit vollflächigen oder selektiven Schichten zum Einsatz. Diese Kontaktoberflächen lassen sich anschließend für spezielle Kontakteigenschaften zur Stromübertragung oder für Verbindungstechniken wie Ultraschall-, Laser- oder Widerstandsschweißen sowie Löt-, Klebe-, Steck-, Schneid- und Klemm-Verbindungen nutzen.

In der Praxis finden sich Bauteile mit wenigen (siehe Abbildung 2-3) und mit vielen Leiterbahnen wieder. Bei sehr komplexen Produkten, z.B. von Steckerleisten, sind Inserts mit über 50 Leiterbahnen in einem Bauteil üblich. Gängige Anforderungen an das Fertigbauteil sind Positionstoleranzen aus Tabelle 2-2 für die aus dem Kunststoff austretenden Kontaktpins.

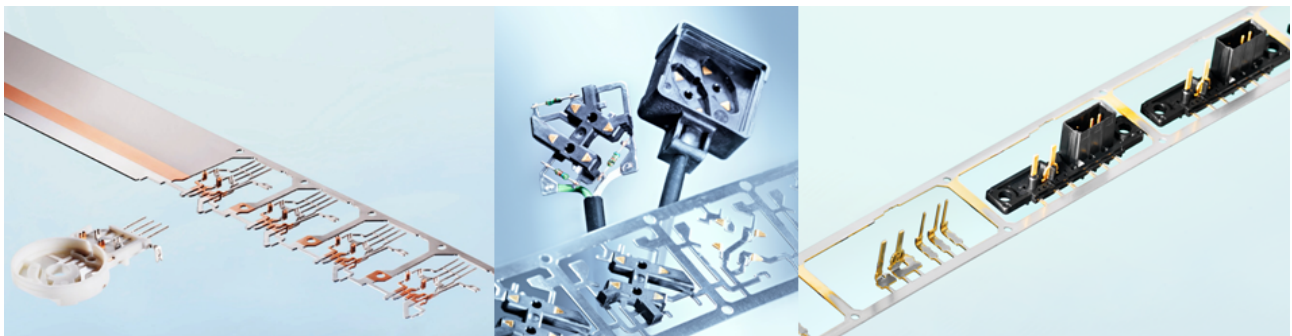


Abbildung 2-3: Kunststoff-Metall-Bauteile (Quelle: Inovon)

Neben den allgemeinen Fehlerbildern an Standard-Kunststoff-Bauteilen gibt es für Kunststoff-Metall-Bauteile vor allem die folgenden typischen Fehlerbilder:

- Spritzgrat durch Überspritzung im Dichtbereich
- Metall- und Kunststoffabschabungen am Bauteil
- Abdrücke und Verquetschungen am Insert im Dichtbereich
- Kratzer an den Funktionsflächen durch das Einlegen der Inserts
- Elektrischer Kurzschluss durch Metallflitter oder ungenügend fixierte Leiterbahnen
- Spannungsrisse des Kunststoffs im Bereich der Inserts
- Austretende Kontaktpins aus dem Bauteil außerhalb der Toleranz
- Verformung des Bauteils durch asymmetrische Schwindung

2.3 Fertigungssysteme für Kunststoff-Metall-Bauteile

Im Hinblick auf die Fertigungssysteme lassen sich Kunststoff-Metall-Bauteile grob in zwei Kategorien von Produktgruppen einteilen. In der ersten werden lose Metallinserts, wie z.B. einzelne metallische Leiterbahnen, umspritzt (siehe Abbildung 2-4). Die zweite Kategorie nutzt die Möglichkeit der Inserttechnik am Stanzgitter (siehe Abbildung 2-5).

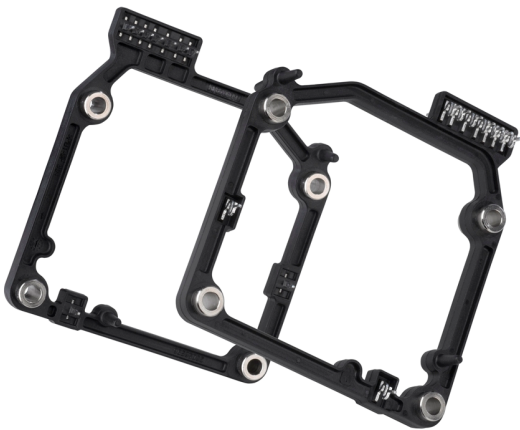


Abbildung 2-4: Inserttechnik mit losen Inserts (Quelle: Inovon)

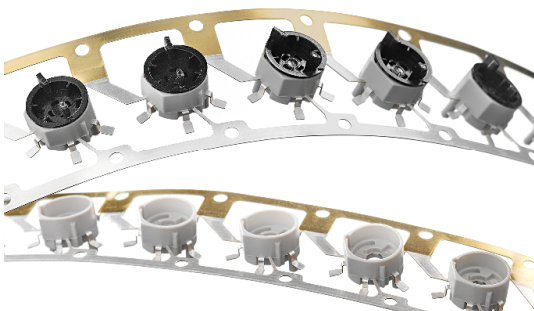


Abbildung 2-5: Inserttechnik am Stanzgitter (Quelle: Inovon)

Je nach Design treten am Kunststoffkörper für das Produkt funktionslose Metallanbindungen aus, die jedoch für die Anbindung am Stanzgitterstreifen notwendig sind. Durch das nachträgliche Abstanzen der galvanisierten und umspritzten Inserts entstehen am Fertigteil blanke Stanzkanten. Um aber auch bei filigranen oder einer großen Anzahl an Inserts einen schnellen und korrekten Einlegeprozess zu gewährleisten, kann es sinnvoll sein, das Produktdesign explizit für eine Stanzgitterbandumspritzung auszulegen. Im Vergleich bestehen für Kunststoff-Metall-Bauteile mit losen Inserts größere Freiheiten bei dem Produktdesign.

Die Oberflächenbeschichtungen können auf Teile im Schüttgut in einer Trommelgalvanik oder aber in Form einer Vollband- oder Stanzgitterbandgalvanik aufgebracht werden.

Bei der Bandanlagentechnik werden die endlos gestanzten Inserts am Stanzgitter in Galvanikanlagen mit einer Länge von über 30 bis 150 Meter bei kontinuierlicher Geschwindigkeit

beschichtet. Entscheidend für die Teilekosten sind u.a. der Edelmetalleinsatz und die Metallabscheidungsgeschwindigkeiten [Lan06].

2.3.1 Werkstückträger-Wechseltisch

Das System des Werkstückträger-Wechseltisches (WT-Wechseltisch) wird auch Drehtisch oder Rundtischmaschine genannt (vgl. [Kle02, Joh04, JM04]). Ihn gibt es bei vielen Herstellern von Spritzgießmaschinen „schlüsselfertig“ zu kaufen. Aufgrund des Einlegefreiraums und der Fixierbarkeit der Inserts durch ihr Eigengewicht wird vor einer vertikalen Spritzgießmaschine ein Drehtisch angebaut. Auf diesem können eine oder mehrere Unterhälften des Spritzgießwerkzeugs angebracht werden (siehe Abbildung 2-6), so genannte Werkstückträger. Die Düsenseite befindet sich als Werkzeugoberhälfte in der Spritzgießmaschine.

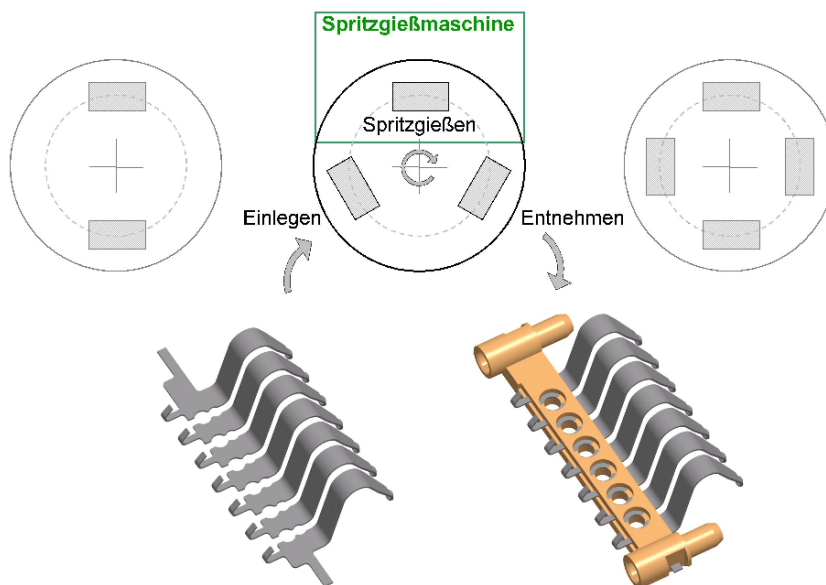


Abbildung 2-6: Fertigungssystem WT-Wechseltisch (Quelle: Inovon)

Trotz des drehenden Tisches sind die Kühlwasserkreisläufe und elektrischen Anschlüsse ununterbrochen gewährleistet.

Das Bestücken der Kavität mit Inserts und das Entnehmen der umspritzten Einlegeteile findet außerhalb des Einspritzraumes am drehbaren WT-Wechseltisch statt.

Ab zwei Werkzeugunterseiten können Inserts parallel zum Spritzgießprozess in die Kavität eingelegt und entnommen werden. Dies führt zu einer Verringerung der Gesamtzykluszeit.

Auf Werkzeugtemperatur vorgewärmte Einlegeteile können vorteilhaft die Produktqualität beeinflussen, allerdings das Handling erschweren.

Der Einlege- und Entnahmevorgang kann (aufgrund des horizontalen Drehtellers) gut von Hand ausgeführt oder automatisiert werden, z.B. mittels eines Greifers. Hierbei ist dann die Lageorientierung der losen Inserts zu beachten, um einen reproduzierbaren Greif- und Ablegevorgang zu gewährleisten.

Mögliche Fehlerquellen beim manuellen Bestücken der Kavität sind Schwankungen bei der Ausführung, die eine zufriedenstellende Prozessqualität in Frage stellt, wie z.B. unterschiedlich lange Öffnungszeiten des Werkzeuges oder das Vergessen oder falsche Bestücken der Kavität [Wor96].

Die Handtätigkeiten konkurrieren bei diesem System mit der Automatisierung bzgl. der Produktionskosten, aber auch bezüglich der Flexibilität wegen der zu produzierenden Produktvielfalt. Hier wird oftmals aufgrund von Stückzahlen, der Reproduzierbarkeit der Produktqualität und dem gewünschten Produktspektrum individuell über den Automatisierungsgrad entschieden.

2.3.2 Werkstückträger-Umlaufsystem

Das Werkstückträger-Umlaufsystem (WT-Umlaufsystem) kann im weiteren Sinne als eine automatisierte Form des WT-Wechseltisches angesehen werden. Dabei befinden sich auf einem geschlossenen Kreislauf mehrere Werkstückträger. Diese durchlaufen unterschiedliche Stationen, u.a. Kavitätenbestückung, Bestückungskontrolle, Spritzgießmaschine und Teileentnahme (siehe Abbildung 2-7).

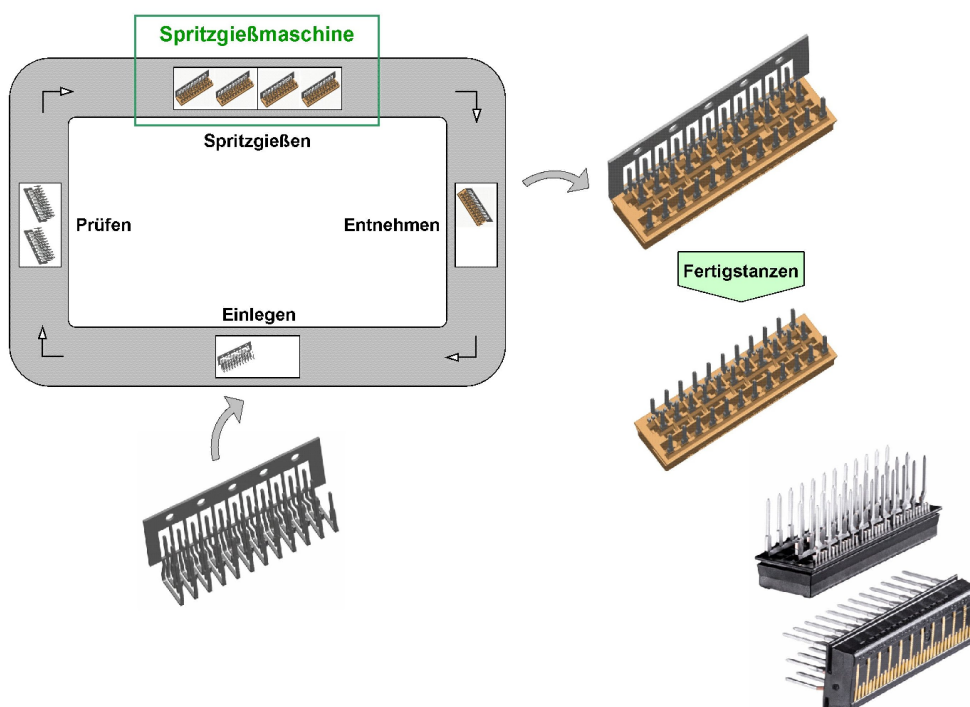


Abbildung 2-7: Fertigungssystem WT-Umlaufsystem (Quelle: Inovon)

Je nach Größe des Kreislaufes und der Anzahl der Werkstückträger sind die Prozessstationen parallelisiert. Bei geeigneter Produktgeometrie ist es möglich, einen Teil der Kühlzeit in die Umlaufstrecke zu verlagern. Kann ein Produkt fast vollständig in die Unterkavität integriert werden, so fungiert die Oberkavität in der Spritzgießmaschine nur noch als „Deckel“. Nach dem Einspritzen der Kunststoffschmelze erfolgt die Nachdruckphase mit geschlossenem Werkzeug. Anschließend

beginnt die Restkühlzeit. Noch vor dem vollständigen Abschluss dieser Kühlphase kann die Kavität geöffnet und der Werkstückträger wieder in den Kreislauf entlassen werden. Dabei kühlt unterwegs das Kunststoff-Metall-Bauteil weiter in der Unterkavität ab und wird erst vor der Entnahme entformt. Das WT-Umlaufsystem erzielt dadurch die kürzeste Zykluszeit im Vergleich zu allen anderen Fertigungssystemen.

Einzelne Werkstückträger können automatisch oder manuell, z.B. aufgrund von Störungen oder Wartungsarbeiten, entnommen und separat wieder eingeschleust werden, ohne den laufenden Fertigungsprozess zu unterbrechen. Lediglich ab einer zu niedrigen Anzahl von Werkstückträgern verlängert sich die Zykluszeit.

Die Werkstückträger sind zwar an mehreren Stationen beheizt, aber an keinen Kühlkreislauf angeschlossen, was sich demzufolge nachteilig auf die Kühleigenschaften der Werkstückträger auswirkt.

Damit findet das System seine Grenzen in der Anwendbarkeit hinsichtlich der Kunststoffmasse von Produkten.

In der Regel ist solch eine Fertigungsanlage vollautomatisch inkl. Qualitätsprüfung und Teileverpackung ausgeführt und somit für eine oder wenige spezifische Produktvarianten ausgelegt.

Um die Kosten der Anlagenautomatisierung und der Werkstückträger (es sind ca. vier bis acht Stück notwendig) wirtschaftlich zu rechtfertigen, ist eine entsprechend hohe Produktionsmenge pro Jahr sowie über den gesamten Produktlebenszyklus erforderlich.

2.3.3 Reel-to-Reel System

Das Fertigungssystem für einen Reel-to-Reel Prozess besteht aus Stanzautomaten bzw. Spritzgießmaschinen, bei der das Verfahren der Stanzgitterumspritzung auf Standardmaschinen zum Einsatz kommt.

Die Metallinserts in Form eines Stanzgitterbandes befinden sich endlos auf einer Spule (im folgenden als „Coil“ beschrieben) und müssen während des Gesamtprozesses immer wieder ab- und aufgewickelt (vgl. [JM04, Hol07]) sowie zwischengelagert werden (siehe Abbildung 2-8). „Endlos“ ist nur umgangssprachlich zu sehen, abhängig vom Design und der Coilgröße können sich ca. zwischen 3.000 und 100.000 Teile auf einem Coil befinden.

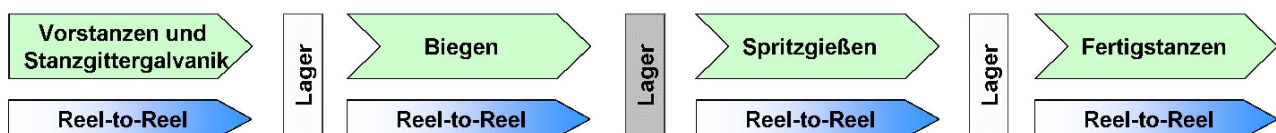


Abbildung 2-8: Fertigungssystem Reel-to-Reel

Das Spritzgießen kann sowohl auf vertikalen als auch auf horizontalen Spritzgießmaschinen durchgeführt werden. Eine Vorschubeinheit an jeder Maschine sorgt für das automatische Zuführen des Stanzgitterbandes in den Prozess. Dafür ist eine Anhebung des Stanzgitterstreifens notwendig, um gebogene und umspritzte Teile durch die geöffneten Werkzeuge zu befördern.

Fangstifte in den Werkzeugen und Fanglöcher im Stanzgitterband machen die Positionierung der Teile möglich.

Oft werden die Stanzwerkzeuge einfach oder zweifach und die Spritzgießwerkzeuge zweifach bis 32-fach ausgelegt. Um auch hier auf Werkzeugtemperatur vorgewärmtes Stanzgitter in den Spritzgießprozess einfließen lassen zu können, wird üblicherweise vor dem Spritzwerkzeug eine Streifenvorwärmstation integriert.

Das mehrfache Spritzgießen am Stanzgitter hat im Gegenzug zum Einzelteilspritzgießen höhere Anforderungen an die Einlegegenauigkeit, weil pro Zyklus mehrere Inserts gleichzeitig am Stanzgitter in das Spritzgießwerkzeug eingelegt werden. Damit anschließend die umspritzten Teile vom Stanzband bzw. die zusammenhängenden Leiterbahnen noch voneinander getrennt werden können, erfolgt noch das Fertigstanzen. Die fertigen Teile können jetzt als lose Einzelteile oder weiterhin am Stanzband aufgewickelt geliefert werden.

Die letzte Variante hat einen Vorteil für weiterverarbeitende Prozesse. Das Kunststoff-Metall-Bauteil steht bereits lageorientiert zur Verfügung, wie z.B. für die Montage von Widerständen oder anderen Bauteilen.

Es ist bei diesem Konzept möglich, die Produktionszykluszeit je Prozessschritt zu minimieren, weil die einzelnen Fertigungsschritte (Stanzen und Spritzgießen) örtlich getrennt voneinander ausgeführt werden. Dafür muss jede Fertigungsstufe zwischengelagert werden. Die Ab- und Aufwickelvorgänge beschränken das Bauteil in Höhe und Länge. Daher ist dieses Fertigungskonzept tendenziell gut geeignet für flache und kurze Teile.

2.3.4 Reel-to-Line System

Das System einer Fertigung mittels eines Reel-to-Line Prozesses ähnelt dem des Reel-to-Reel Prozesses, weist aber einige Unterschiede auf. Die Standardmaschinen sind in Reihe hintereinander aufgestellt und das Stanzgitterband durchläuft über Pufferschlaufen alle geplanten Fertigungsstufen. Pufferschlaufen sind kurze Materialspeicher und können mittels Schwingersystemen gesteuert werden [Kie07]. Der Spritzgießzyklus als langsamster Prozess gibt die Taktzeit für die Stanzautomaten vor. Die schnelleren Prozesse müssen auf die langsameren warten und die Produktion kurzzeitig aussetzen. Ist der Materialspeicher in der Pufferschleife durch den Stanzautomaten gefüllt, so hört dieser auf zu produzieren, bis die Spritzgießmaschine wieder das Material aus dem Puffer entzogen hat.

Weiterhin ist eine Qualitätsregelung über mehrere Fertigungsstufen möglich, weil produktionsbegleitend prozessübergreifende Qualitätsausprägungen vom Zwischenprodukt zum Endprodukt reflektiert werden können.

Durch den Entfall der Ab- und Aufwickelvorgänge reduziert sich auch die Deformationsgefahr. Die Lagerung von Zwischenprodukten kann entfallen (siehe Abbildung 2-9). Daher sind mit diesem System tendenziell größere Produktgeometrien mit aufwendigeren Stanz-Biege-Operationen herstellbar als mit Reel-to-Reel.

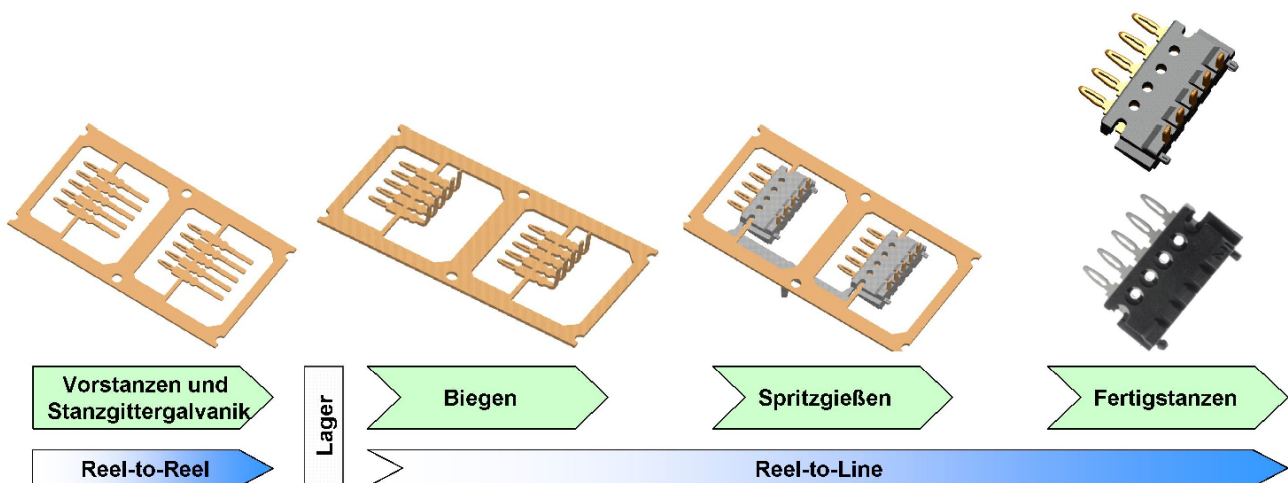


Abbildung 2-9: Fertigungssystem Reel-to-Line (Quelle: Inovant)

Im weiteren Vergleich ist die Differenz des absoluten Platzbedarfs zwar nur gering, aber verkettete Maschinen benötigen am Stück eine höhere Quadratmeteranzahl an Stellfläche als Einzelmaschinen. Zudem schränkt die festgelegte Maschinenreihenfolge den Prozessdurchlauf ein. Außerdem können aufgrund des verfügbaren Maschinenparks „überdimensionierte“ Maschinen zum Einsatz kommen, was zu erhöhten Maschinenstundensätzen und schlussendlich auch zu einem höheren Teilepreis führt. Generell ist es wichtig, dass das Bedien- und Qualitätspersonal sowohl Kenntnisse von Stanz- als auch von Spritzgießprozessen besitzt.

2.3.5 Tisch-System

Das Tisch-System wurde von einem Sondermaschinenbauer entwickelt. Es vereint die Prozessstufen von Reel-to-Line auf ca. einem Drittel des notwendigen Platzbedarfs. Um die Pufferschlaufen zwischen den Prozessen einzusparen, wird der Stanzgitterstreifen immer horizontal weitertransportiert. Beide Werkzeughälften der Stanz- und Spritzgießwerkzeuge müssen daher einen Öffnungs- und Schließhub ausführen. Dadurch kann die Streifenanhebung in den Werkzeugen bei diesem Konzept entfallen. Die eigens durch den Sondermaschinenbauer integrierten Spritzgieß- und Stanzmodule bringen zusätzliche Platzeinsparungen (vgl. [Bau11, Rez10, Sch07a, Tra10]).

Bei Mehrfachumspritzung sind die Spritzgieß- und Stanzprozesse in der Regel asynchron im Einsatz. Öffnet sich beispielsweise nach einer Vierfach-Umspritzung das Spritzgießwerkzeug, so wird das Stanzgitterband im einfachen Takt weitertransportiert und es führen die vor- und nachgelagerten Stanzprozesse jeweils einen Hub aus. Das Spritzgießwerkzeug bleibt für diese Zeit geöffnet. Nach insgesamt vier Stanzhuben kann sich das Spritzgießwerkzeug wieder schließen und der Prozess beginnt von vorn. Die Gesamtzykluszeit ergibt sich aus der Zykluszeit vom Spritzgießen und Stanzen.

In wie weit sich Temperatureinflüsse der Stanzstreifenvorwärmung und des Spritzgießprozesses bei den kurzen Distanzen zwischen den Werkzeugen auf die Qualitätsausprägungen der Stanzprozesse auswirken, ist produktspezifisch zu betrachten.

Eine beliebige Anpassung der Prozessabfolge kann durch unterschiedliche Platzierung der Maschinenelemente vorgenommen werden. Damit erzielt das System eine höhere Flexibilität für ein größeres, potentiell Produktpektrum. Trotz des Sondermaschinenbaus können die Anschaffungskosten gegenüber den Konzepten mit Standardmaschinen günstiger ausfallen, u.a. weil nur eine Vorschubeinheit für den Gesamtprozess benötigt wird und eine zentrale Maschinensteuerung in dem Tisch-System integriert ist.

Das System bietet sich für kleinere Bauteile mit kurzem Vorschubtakt und wenigen Stanzoperationen aber auch für schnelle Produktwechsel mit kurzen Rüstzeiten an.

2.3.6 Hybrid-Werkzeug System

Wie der Name des Hybrid-Werkzeug Systems beschreibt, finden alle Stanz- und Spritzgießprozesse in einem gemeinsamen Werkzeug statt. Hierzu wird nur eine Kopf- und Grundplatte benötigt und die Teilprozesse sind modular voneinander abgegrenzt.

In der Industrie werden sowohl Stanzautomaten als auch Spritzgießmaschinen zum Betreiben von Hybrid-Werkzeugen eingesetzt (vgl. [Pal11, Sch07b, Sch10a]).

Auf Spritzgießmaschinen fungiert entweder die Schließeinheit zusätzlich als Stanzautomat, um die notwendige Schneidkraft beim Stanzen zu erzeugen, oder die Schneidstempel werden durch einen Kernzug betätigt. Wird ein Stanzautomat als Hauptmaschineneinheit gewählt, so ist seitlich am Spritzgießwerkzeugmodul eine Spritzgießeinheit als Sonderentwicklung angeordnet.

Da alle Module mit dem gleichen Öffnungs- und Schließrhythmus gekoppelt sind, müssen die Stanzwerkzeuge der Formnestanzahl des Spritzgießwerkzeuges angeglichen sein. Wird also eine Zweifach-Umspritzung angewendet, so müssen auch die Stanzwerkzeuge zweifach ausgelegt sein.

Die Prozessreihenfolge kann bei der Realisierung des Hybrid-Werkzeugs festgelegt werden. Die gegenseitigen Temperatureinflüsse der Werkzeugmodule und die Auswirkungen der Stanzstreifenerwärmung sind bei diesem Konzept am stärksten ausgeprägt.

Der Platzbedarf ist geringer als bei Reel-to-Line Fertigungssystemen und es ist hier ebenfalls weniger Peripherie notwendig. Dafür muss die Spritzgießmaschine oder der Stanzautomat allerdings einen größeren Einbauraum gewährleisten, um ein Hybrid-Werkzeug betreiben zu können.

Das Handling ist für den Bediener, resultierend aus den kurzen Prozessabständen, erschwert. Die Übergänge der Werkzeugmodule sind visuell nicht so gut einsehbar wie bei den anderen Systemen. Einstell- und Anfahrteile sowie verschleppte Kunststoff- und Metallflitter sorgen möglicherweise für ungewollte Qualitätsausprägungen in den anschließenden Prozessstufen.

Das Hybrid-Werkzeug System hat Vorteile bei größeren Kunststoff-Metall-Bauteilen mit nur einem Formnest im Spritzgießwerkzeug und wenig komplexen Stanz-Biege-Operationen.

2.3.7 Prüf- und Verpacksysteme

Die Schritte nach der Fertigung beinhalten oft die Produkt-Prüfung und -Verpackung.

Für das Thema Prüfen können in der Praxis den mechanischen Fertigungsschritten Prüfsysteme nachgeschaltet werden. Diese Systeme sollen einen Fehler sofort nach ihrem Auftreten oder in einem kurzen Abstand danach automatisch erkennen, anzeigen und ggfs. ausschleusen [Som08]. Diese Prüfsysteme sind in der Regel mit unterschiedlichen Prüfstationen modular aufgebaut und in verschiedenen Anordnungen umsetzbar (siehe Abbildung 2-10).

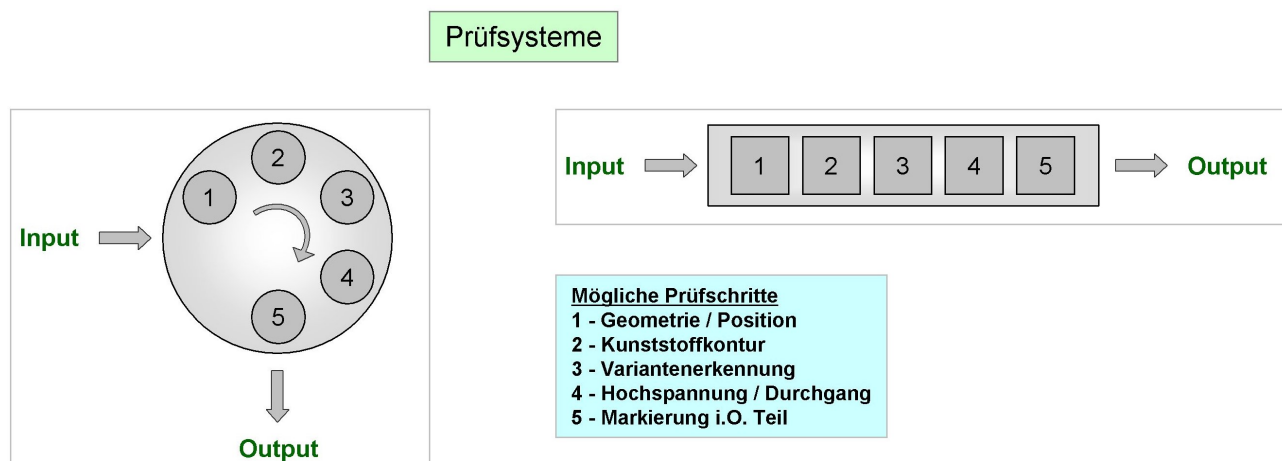


Abbildung 2-10: Modulare Prüfsysteme

Abhängig von den Qualitätsansprüchen an das Produkt und dem gewünschten Prüfturnus (bis zu 100% Prüfungen) sind z.B. folgende Prüfschritte typisch:

- Messungen der Bauteilgeometrie - Maße, Form- und Lagepositionen

Idealerweise können die Teile im Prüfsystem möglichst gleich wie in der Qualitätssicherung ausgerichtet und vermessen werden. Sind z.B. am Endprodukt die Form- und Lageposition von mehreren Steckern mittels einer taktilen Messung vorgesehen, so kann diese Messung auf einer Koordinatenmessmaschine bereits einige Minuten pro Teil in Anspruch nehmen. Folglich greift man in der produktionsbegleitenden Messung oft auf schnellere, optische Messmethoden zurück. Die unterschiedlichen Messmethoden und Messmittelfähigkeiten sollten miteinander abgeglichen werden.

- Konturprüfung bzw. -vergleich von Metall und Kunststoff

Diese Prüfung ist geeignet für sehr kurze Zykluszeiten wie z.B. die Geometrieüberwachung beim Stanzen von 1.000 Hub pro Minute, oder einer Überwachung von Mehrfachkavitäten beim Spritzgießen, wie z.B. bei einer 128-fach-Umspritzung eines LED-Sockels im Stanzgitter.

- Erkennung von Unterschieden bei Variantenvielfalt

Sind mehrere Produktvarianten gleichzeitig oder auch nacheinander in der Fertigung im Durchlauf, so müssen spezielle Variantenmerkmale erkannt werden können.

- Spannungsprüfungen

Spannungsprüfungen sollen z.B. Leiterbahnen eines Produktes auf elektrische Kurzschlüsse oder Unterbrechungen kontrollieren.

Erweitert können in Prüfsystemen auch, je nach Anforderungen, eine Laserbeschriftung der Teile, eine Markierung von Gutteilen und eine Ausschleusung von erkannten Ausschussteilen stattfinden.

Für das Thema Verpacken können ebenfalls Automatisierungsmaßnahmen vorgenommen werden. Das Spektrum der Verpackungen ist groß und kann bei Bedarf, bzw. im kundenspezifischen Produktbereich eher die Regel, individuell notwendig werden. Einzelteile können ungeordnet als Schüttgut oder geordnet in Blister, im Blistergurt, in Magazinen, in Tubes oder als endlose Stanzgitter bereitgestellt werden. Der Qualitätsanspruch beim Verpacken ist nicht irrelevant. Es gibt für diese Art von Kunststoff-Metall-Bauteilen teilweise sehr hohe Ansprüche an die Funktionsoberflächen bei der Weiterverarbeitung, z.B. beim Ultraschallschweißen, Lötten oder beim Kleben. Hier können geringe Öl- und Fettrückstände oder Verunreinigungen für den Ausfall der Produkte sorgen und so einen maschinellen Verpackprozess erforderlich machen. Selten sieht man in der Praxis einen vollautomatischen Verpackprozess bis zur versandbereiten Ware, der an einen vorgelagerten Fertigungsschritt gekoppelt ist. Bei sehr hoher Stückzahl werden solche Lösungen teilweise eingesetzt, um möglichst ohne Produktionspersonal die Fertigung betreiben zu können.

3 Planung von Fertigungskonzepten

3.1 Planungszeitpunkt und Auswahl von Fertigungskonzepten

Der Produktentstehungsprozess beinhaltet in der Gesamtheit alle Abläufe zur Entwicklung und Umsetzung eines Produktes [Ste05].

Er kann in mehrere Phasen eingeteilt werden: Prototypen, Vorserie und Serie [Pie08]. In der Prototypenphase werden die relativ wenigen notwendigen Produkte noch mit Musterwerkzeugen und alternativen Fertigungsverfahren hergestellt. Bei der Phase der Vorserie sind bereits Serienwerkzeuge mit seriennahen Fertigungsverfahren im Einsatz. Mit Produktionsbeginn des ersten Serienteils (oft auch „start of production“ genannt) dürfen nur noch Serienwerkzeuge mit dem Serienfertigungskonzept eingesetzt werden.

Zu bestimmten Zeitpunkten werden vom Auftraggeber Angebote zur Preissituation bzw. zur Auftragsvergabe eingeholt (siehe Abbildung 3-1).

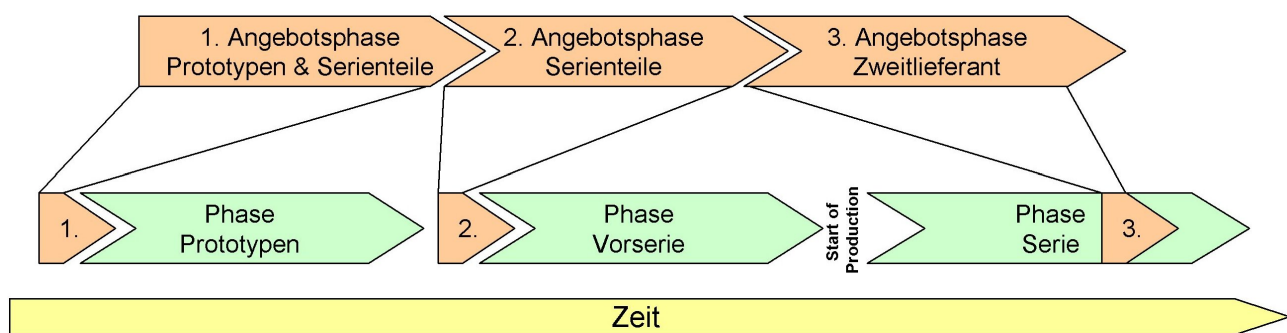


Abbildung 3-1: Phasen des Produktentstehungsprozesses und der Angebote

Die unterschiedlichen weltweiten Lieferanten arbeiten Fertigungskonzepte zur Produktion dieser Bauteile aus und geben ein Angebot an den Auftraggeber ab. Ein Angebot kann individuell an die Wünsche des Auftraggebers angepasst sein und bildet die Vertragskonditionen ab. Es enthält u.a. die Bestätigung der technischen Herstellbarkeit des Produktes (bezogen auf die Anfragedaten hinsichtlich Qualitätsanforderungen, Produktionsmengen und Umsetzungszeiträume), eine Beschreibung des Fertigungskonzeptes, den Teilepreis für die Produktherstellung inkl. Material, die Werkzeugpreise und ggfs. die Kosten für Sonderanschaffungen, aber auch Zahlungsbedingungen und Lieferzeiten.

In der Regel bekommt der Anbieter mit dem niedrigsten Gesamtpreis beim erforderlichen Qualitätsniveau den Auftrag zur Produktion und fristgerechten Lieferung der Produkte. Nicht immer erhält der Lieferant der Prototypen auch den Auftrag für die Serienproduktion. Der Serienauftrag beinhaltet gewöhnlich die Vorserien- und die Serienproduktion. Es kommt in der Branche auch vor, dass für bereits vorhandene Produkte in der Serienphase noch ein Zweitlieferant benötigt bzw. gewünscht ist, um z.B. Lieferengpässe kompensieren zu können. Der Zweitlieferant profitiert von den definierten Rahmenbedingungen und Erfahrungen im Hinblick auf Materialien, Design inkl. Toleranzen und Funktion von dem bereits existierenden Kunststoff-Metall-Bauteil. Nachteilig für ihn ist, dass er idealerweise zu einem günstigeren Preis die bessere Qualität als der Erstlieferant abliefern muss, damit er den Auftrag erhält.

Bewegt man sich zeitlich vom Serienstart immer früher in die Produktentstehung, so wird es für den Lieferanten schwieriger und unsicherer, die spätere Serienrealität abzuschätzen. Auch der Auftraggeber kennt in einem frühen Stadium seine eigenen Anforderungen an das Produkt oft nicht in vollem Umfang. Typischerweise können bereits erste Erkenntnisse in der Projektabwicklung eine neue Projektgrundlage erfordern.

Unabhängig davon ob ein Lieferant von Kunststoff-Metall-Bauteilen Aufträge als Erst- oder Zweitlieferant erhält, benötigt er für sich selber eine möglichst hohe Kostentransparenz über das von ihm ausgewählte Fertigungskonzept. Gleich in welcher Lieferantenrolle er sich auch befindet, wenn die kalkulierten Kosten niedriger als die späteren tatsächlichen Kosten sind, muss er den Mehraufwand selber finanzieren. Das angestrebte Modell wird den Lieferanten dabei unterstützen, seine eigenen erwarteten Kostenstrukturen für ein Angebot der Serienproduktion genauer als bisher ermitteln zu können und das bereits ab Beginn der ersten Angebotsphase.

Für die Anwendung des Modells sind einige Informationen zum künftigen Auftrag als Input notwendig. Es werden die Produktinformationen (Geometrie inkl. Toleranzen, Materialien, Anlieferzustand, etc.) und die Abrufmengen pro Zeitintervall sowie die erwartete Produktlebenszeit vom Auftraggeber benötigt. Der Lieferant arbeitet ein Fertigungskonzept unter der Beachtung der Anfragedaten aus. Darin wählt er grob die Produktionsabfolge vom Wareneingang über die notwendigen Fertigungsschritte bis zum Warenausgang und detailliert darauf aufbauend seine Produktzwischenstufen. Nachdem für jeden einzelnen Fertigungsschritt die Umfänge der Produktbearbeitung ausgearbeitet sind, können die zugehörigen Werkzeuge kalkuliert sowie die zur Produktion notwendigen Maschinen inkl. Peripherie und das Bedienpersonal ausgewählt werden. Durch die definierten Maschinen- und Personalstundensätze des Lieferanten sowie den erwarteten Leistungsdaten der ausgewählten Fertigungssysteme lassen sich Maschinen-, Personal-, und Werkzeugkosten ermitteln. Parallel sind mit dem ausgearbeiteten Design der Produktzwischenstufen sowie der angegebenen Stückzahl vom Auftraggeber die erforderlichen Mengen an Rohmaterial ermittelbar und ermöglichen bei bekannten Rohmaterialpreisen eine Berechnung der Materialkosten. Mit ausgewählten Rüstzeiten für jedes Fertigungssystem und der geplanten Produktionslosgröße lassen sich Rüst- und Bestandskosten ausrechnen.

Somit ist der Lieferant bereits in einer frühen Phase des Produktentstehungsprozesses in der Lage, seine geplanten Fertigungskonzepte nach den erwarteten Maschinen-, Personal-, Material-, Werkzeug- sowie Rüst- und Bestandskosten aufzuschlüsseln und gezielt kostenoptimierende Maßnahmen einfließen zu lassen.

Der Schwerpunkt des Modells liegt auf der Kostenkalkulation für die Durchführung der Serienproduktion mit den geplanten Fertigungssystemen. Weitere mögliche anfallenden Kosten wie z.B. für das Organisieren der Projektierung oder anderweitige administrative Tätigkeiten (u.a. Kosten für die Serienbetreuung durch Qualitäts- oder Vertriebspersonal) sind nicht Bestandteil des Modells und müssen separat betrachtet und zusätzlich in die Angebote eingearbeitet werden.

Hat ein Auftraggeber genügend Detailwissen über die Fertigungskonzepte und Prozessauslegung für die Herstellung von Kunststoff-Metall-Bauteilen, so kann auch er bereits ab einem sehr frühen Stadium sein entwickeltes Produktdesign hinsichtlich Kosten selbst bewerten.

Ist das Produktdesign vom Auftraggeber fixiert und die Vertragsdaten beidseitig akzeptiert, kann der Lieferant nach erhaltenem Auftrag mit der Realisierung beginnen. Der Projektierungszeitraum der Vorserie vom Konstruktionsstart aller Werkzeuge bis zur Produktserienreife ist stark von der Komplexität des Bauteiles und anderen Faktoren abhängig.

Nach Aussage von Lieferanten für Kunststoff-Metall-Bauteile sind im Allgemeinen folgende Umsetzungszeiträume für die Phase der Vorserie in der Branche üblich:

- Stanz- und Spritzgießwerkzeuge: ca. ein bis fünf Monate
- Lieferzeit Halbzeug: ca. ein bis drei Monate (teilweise bei Sonderlegierungen bis zu sechs Monate oder länger)
- Herstellung von Sondermaschinen für die Produktion: bis zu einem Jahr oder länger

3.2 Möglichkeiten zur Gestaltung der Prozessabfolgen von Fertigungssystemen

3.2.1 Prozessabfolge

In jeder Angebotsphase für Kunststoff-Metall-Bauteile stellt sich die Frage nach den Auswahlmöglichkeiten und der Zusammenstellung der Prozessabfolge zur Herstellung des angefragten Produktes.

Jeder Fertigungsschritt bekommt einen Input und liefert einen Output (siehe Abbildung 3-2). Die Verbindung erfolgt durch Handling-Operationen, welche den Fertigungsschritt in seiner Produktionsgeschwindigkeit möglichst nicht oder nur sehr kurz unterbrechen sollten. Generell empfiehlt es sich, vor bzw. nach jeder Aktion eine Qualitätsprüfung durchzuführen, ob das Handling oder der Fertigungsschritt korrekt abgeschlossen ist bzw. der richtige Input zur Verfügung steht. Als Input liegen entweder metallische Inserts oder bereits Kunststoff-Metall-Bauteile vor. Diese Teilezustände müssen ggfs. in ihrer Lage geordnet werden, um sie anschließend greifen, fördern und wieder ablegen zu können. Danach erfolgen die Fertigungsschritte Stanzen, Galvanik, Biegen, Spritzgießen und Austrennen. Aber auch das Prüfen sowie das Verpacken der Bauteile gehören zum Fertigungsprozess und somit zur Wertschöpfungskette dazu. Das Prüfen und Verpacken können einen entscheidenden Einfluss für die Auswahl und die Höhe der Kosten des Fertigungskonzeptes haben.

Nach jedem Fertigungsschritt stehen unterschiedliche Formen des Handlings wieder zur Verfügung. Hierzu gibt es die gleichen Möglichkeiten wie nach dem Input.

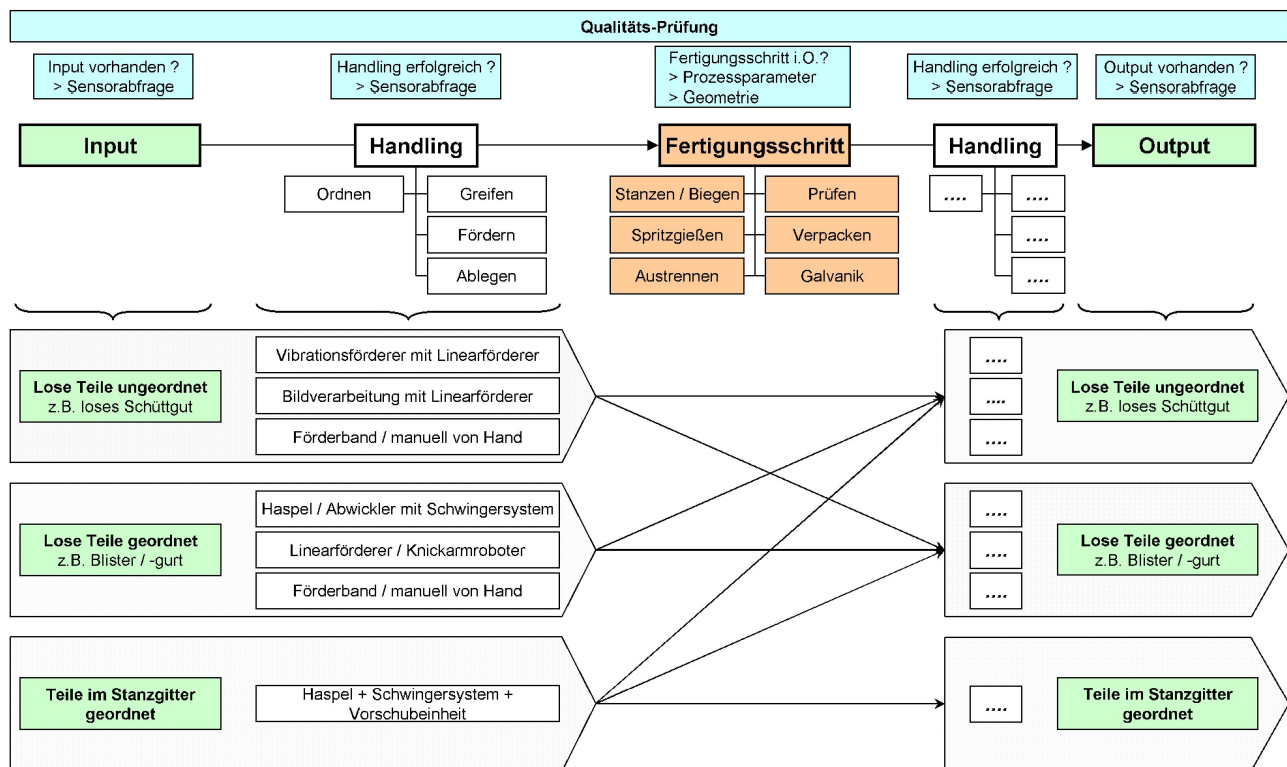


Abbildung 3-2: Übersicht Prozessabfolgemöglichkeiten

- Lose Teile ungeordnet

Liegen die Teile beim Input als loses Schüttgut vor, so können diese z.B. mechanisch über einem Vibrationsförderer geordnet werden.

Vibrationsförderer sind Schwingungssysteme, die ungeordnete Teile kleiner bis mittlerer Abmessungen aus Materialspeichern in eine definierte Lage bringen. Der Aufwand an Material und technischer Umsetzung ist relativ gering im Vergleich zu anderen Fördersystemen [NRM08].

Das geordnete Schüttgut liegt anschließend zur Abholung bereit. Ein angeschlossener Linearförderer mit Greifereinheit kann das Teil greifen, befördern und wieder definiert für den darauf folgenden Schritt ablegen.

Gegenseitige Teileberührungen im Materialspeicher lassen sich technisch berücksichtigen und eventuell vermeiden. Auf der Vibrationsstrecke hingegen finden zwangsweise Berührungen zwischen Teil und Vibrationsförderer statt. Das kann zu Abschabungen und Kratzer bis hin zum Verlust der Funktion des Bauteils führen.

Um diese Beschädigungen am Produkt zu vermeiden, gibt es noch weitere Möglichkeiten. Das lose Schüttgut kann auch mittels einer Kamera und einer Bildverarbeitungssoftware sowie einem Linearförderer in eine definierte Teilelage gebracht werden. Die Investitionskosten für den Prozess mittels Bildverarbeitung sind im Verhältnis zum Vibrationsförderer höher. Damit aber mit dem Modell für die Kostenermittlung konkrete Aussagen über die Wirtschaftlichkeit einer Lösung getroffen werden können, sind neben den Leistungsdaten auch die noch später folgenden Bewertungen mittels Effektivität und erwarteten Produktionsstückzahlen entscheidend.

Alternativ wäre dieses Handling manuell auch von Hand möglich. Als Richtwert kann davon ausgegangen werden, dass eine Person für die Aufgabe „Teile greifen, ordnen und definiert absetzen“ ca. ein bis drei Sekunden pro Teil benötigt. Ist ein von Hand ausgeführter Prozess zeitlich sehr eng mit einem Fertigungsschritt gekoppelt, wie z.B. das Einlegen von Inserts in das Spritzgieß-Werkzeug, kann dies zu ungewollten Schwankungen der Prozessdauer führen.

- Lose Teile geordnet

Der bereits definierte Lagezustand vereinfacht das Greifen der Teile. Hier ist das direkte Abholen mittels eines Greifers möglich, z.B. wenn sich geordnete Teile in einer Blistergurtkammer befinden. Teile, die im Blister oder Magazinen eingelegt sind, können durch die menschliche Hand schneller und mit konstanterer Zeit verarbeitet werden als ungeordnete Teile.

- Teile im Stanzgitter geordnet

Beim Stanzen des Halbzeugs werden die Teile inkl. anhängenden Trägerstreifen gestanzt. Der Trägerstreifen kann zum Weitertransport und im Werkzeug zur Positionierung genutzt werden, ohne die Teile selber zu kontaktieren oder zu beschädigen. Auch filigrane Teile lassen sich mit dieser Methode sehr gut qualitativ hochwertig verarbeiten. Die Stanzgitter inkl. Trägerstreifen sind auf Coils aufgewickelt und müssen mittels einer Haspel abgewickelt werden. Ist nach dem Fertigungsschritt ein erneutes Aufwickeln geplant, so ist eine weitere Haspel erforderlich. Diese Art von Peripherie ist in der Regel für ein großes Produktspektrum verwendbar und als Standardeinrichtung von Maschinenbauunternehmen beziehbar. Die Verwendbarkeit einer Maschine oder einer Peripherie für mehrere Produkte wird sich im Modell auf die Kosten eines Fertigungskonzeptes auswirken können.

Für die Erstellung eines Produktes sind in der Regel mehrere Varianten für die Fertigungsabfolge möglich. Das Modell integriert zur Kostenkalkulation die Prozessabfolgen für jedes Fertigungssystem inkl. der ausgewählten Peripherie hinsichtlich Anschaffungskosten und Effektivität. Dadurch werden die wirtschaftliche Bewertung einer Prozessabfolge und der Vergleich von unterschiedlichen Prozessabfolgen darstellbar.

3.2.2 Simulation von Fertigungssystemen

Die Planung von Standardmaschinen und -prozessen für Fertigungssysteme ist bei der Angebotsausarbeitung einfacher und schneller durchzuführen als für speziell entwickelte Sondermaschinen und -prozesse. Steigt die Komplexität des Fertigungskonzeptes durch mehrere verkettete Fertigungssysteme oder einem hohen Automatisierungsgrad, kann die virtuelle Abbildung und Simulation der geplanten Realität bereits im Vorfeld Probleme aufzeigen. In Analogie zur Produktmodellierung können durch entsprechende IT-Systeme auch die Planung, Optimierung und Absicherung vieler fertigungsrelevanter Prozesse durchgeführt werden [GGE01].

Bei der virtuellen Abbildung der Realität sollten möglichst das Endprodukt des Kunden und auch alle Produktzwischenstufen sowie Werkzeuge, Maschinen, Gebäude, etc. als 3D-Modelle generiert und verfügbar sein.

Im Stadium der Anfrage von kundenspezifischen Produkten sind Produktzwischenstufen und Werkzeuge sowie Sondermaschinen in dieser Form noch nicht vorhanden, was den Aufwand für eine Simulation beträchtlich erhöhen kann. Vor der Durchführung einer Simulation sollte der geschätzte Aufwand mit dem Nutzen der Simulationsergebnisse gegenübergestellt und bewertet werden. Weiterhin wird das Hinzuziehen von Simulationsexperten für die komplexen Aufgaben empfohlen, was zusätzlich den Kostenaufwand erhöht [Fri07]. In der Praxis wird das Simulieren von speziellen Fertigungskonzepten für die üblicherweise kostenlosen Angebote vor Erhalt des Auftrags nur selten angewendet. Mit Auftragseingang und Realisierung des Auftrags kann bei zunehmendem Fortschrittsgrad der Detaillierung von Produkten, Werkzeugen, Sondermaschinen, etc. die Simulation durchaus eine Möglichkeit sein, um die Zeitspanne von der Planung bis zur Umsetzung und Inbetriebnahme neuartiger Fertigungskonzepte mit hohem Automatisierungsgrad zu verkürzen. Die Projektierungszeit kann ein entscheidender Faktor für die Auftragsvergabe sein.

3.3 Entscheidungseinflüsse bei der Planung von Automatisierungsmaßnahmen

Bereits in der Phase der Angebotsausarbeitung für Kunststoff-Metall-Bauteile stellt sich die Frage, welche Maschineneinrichtung für die Fertigungssysteme eingesetzt bzw. verwendet werden sollte. Die Grundmaschinen für das Stanzen und Spritzgießen sind durch die Produktgeometrie, das Produktvolumen und die Produktwerkstoffe unter Mitbeachtung der erforderlichen Werkzeuge relativ schnell ausgewählt.

Inwieweit sich hierbei der automatisierte Übergang von Fertigungsschritt zu Fertigungsschritt gestaltet, ist nicht nur aus quantitativer sondern auch aus qualitativer Sicht entscheidend für den Teilepreis. Wichtig ist eine maximale Produktionsausbringung von Gutteilen in einer vorgegebenen Zeit.

Die Übergänge zwischen verketteten Prozessschritten sollten den langsamsten Fertigungsschritt nach Möglichkeit gar nicht oder aber nur sehr kurz unterbrechen.

3.3.1 Produktstückzahlen und Flexibilität von Fertigungssystemen

Das Einlegen von metallischen Inserts in ein Spritzgießwerkzeug ist im Prinzip ein Montageschritt und wird im Folgenden dem Begriff Handling zugeordnet.

Die Durchführung des Handlings kann manuell oder automatisiert vorgenommen werden und ist u.a. von der Anzahl der einzulegenden Teile und der Produktionsmenge abhängig. Die Produktionsstückzahlen von Kunststoff-Metall-Bauteilen im Automotive-Bereich können sich, je nach Auftrag, von wenigen Hundert bis zu mehreren Millionen Teilen pro Jahr darstellen.

Aus quantitativer Sicht wird empfohlen, bei steigender Stückzahl von manuellem Handling auf ein automatisiertes Handling zu wechseln [LW06].

Diese einseitige Sichtweise hat, losgelöst von weiteren Gesichtspunkten, keine eindeutige Aussagekraft hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von Fertigungskonzepten.

Im Zusammenhang mit den Stückzahlen ist auch die Flexibilität von Fertigungssystemen relevant [FDR94]. Das manuelle Handling durch den Menschen bietet eine sehr gute Flexibilität für auszuführende Tätigkeiten. Produktwechsel können zügig mit wenig oder ohne Werkzeug- bzw. Maschinenabstimmung umgestellt und so Produktionsunterbrechungen reduziert werden.

Ein automatisiertes Handling hingegen ist für eine spezielle Aufgabe (ein Produkt oder eine Produktgruppe) konzipiert und lässt sich in der Regel nicht universell verwenden, was den Einsatzbereich für automatisiertes Handling für mehrere Produkte einschränkt oder bei Sonderanfertigung nur für ein Produkt zulässt.

Gleiches gilt für Sondermaschinen mit hohem Automatisierungsgrad, die speziell für die Herstellung eines Produktes geplant sind. Die Investitionskosten müssen dann von diesem einen Produkt finanziert werden. Mit zunehmendem Produktspektrum eines Fertigungssystems sind auch die Investitionskosten auf mehrere Produkte verteilbar, was aus der Sicht der einzelnen Produkte zu niedrigeren Kosten eines jeweiligen Produktes führt.

Aus wirtschaftlicher Betrachtung für ein spezielles Produkt sind ein zunehmender Automatisierungsgrad bei gleichzeitiger Steigerung der Flexibilität von Fertigungssystemen zwei gegenläufige Ziele und u.a. von der Stückzahl des gewünschten Produktspektrums abhängig.

Die Stückzahl ist somit ein entscheidender Faktor zur Planung von Fertigungskonzepten und dennoch abhängig von der Produktvielfalt. Das entwickelte Modell wird sowohl die Stückzahlen und Rüstzeiten für ein Produkt bzw. für ein Produktspektrum sowie weitere Einflussfaktoren von geplanten Fertigungssystemen beinhalten und dadurch eine individuelle Betrachtung des Fertigungskonzeptes ermöglichen.

3.3.2 Produkt- und Fertigungstoleranzen

Fertigungstoleranzen können in drei Rubriken eingeteilt werden (siehe Abbildung 3-3), die unterschiedliche Toleranzfelder aufweisen [LW06]. Ein Toleranzfeld zeigt bei grafischer Darstellung das zulässige Höchstmaß (größtes zugelassenes Maß) und Mindestmaß (kleinstes zugelassenes Maß) an [N.N.94].

Wird bei dem Handling das passende Gegenstück zum Verarbeiten gesucht, so spricht man von einem auswählenden Handling. Dieses ist für das Einlegen von Inserts in sehr eng tolerierte Spritzkavitäten keine wirtschaftlich in Betracht zu ziehende Lösung. Das Qualitätsniveau der in elektromechanischen Komponenten einfließenden Bauteile ist für auswählendes Handling zu hoch und nicht für Serienprozesse zu empfehlen.

Das manuelle Handling wird in der Praxis für Teilprozesse relativ häufig angewendet, oftmals bei niedrigen Stückzahlen oder in Niedriglohnländern auch bei höheren Stückzahlen.

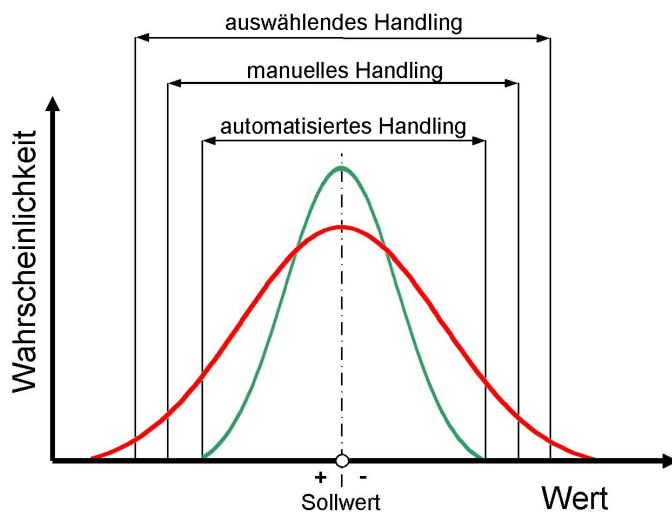


Abbildung 3-3: Qualitative Toleranzbetrachtung der Automatisierung nach [LW06]

Die metallischen Inserts können aber auch sehr filigran gestaltet sein sowie sehr dünne und schmale Leiterbahnen besitzen. In solch einem Fall kann es vorkommen, dass abhängig vom Design des einzulegenden Teiles ein manuelles Handling nicht mehr hinreichend genau reproduzierbar und prozesssicher ausführbar ist. Die Produktgeometrie hat daher einen entscheidenden Einfluss auf den Automatisierungsgrad von Teil- oder Gesamtprozessen und sollte unabhängig von der Stückzahl reflektiert werden.

Der qualitative Unterschied zwischen manuellem und automatisiertem Handling ist in Abbildung 3-3 ersichtlich. Das automatisierte Handling bringt aber nicht nur ein kleineres Toleranzfeld als Ergebnis, es fordert auch ein kleineres Toleranzfeld als Input (siehe grüne Verteilungslinie in Abbildung 3-3). Damit unterliegen Fertigungssysteme, vor allem bei hohen Stückzahlen in Hochlohnländern, einem zwangsweise hohen Automatisierungsgrad in der gesamten Fertigungskette. Verständlicherweise steigt durch die zunehmende Automatisierung auch der Einsatz an Maschinen, Peripherie sowie technischen Hilfsmitteln und somit die Investitionskosten. Das wirtschaftliche Ziel einer erhöhten Automatisierung sollte es sein, dass die notwendige Qualität in kürzerer Produktionszeit und bei niedrigerem finanziellem Gesamtaufwand für das Endprodukt erfolgt.

Das Modell liefert u.a. durch die Effektivitätsbewertung von Fertigungssystemen die Möglichkeit, diese Aspekte mit einzubeziehen und eine Kostenbewertung hinsichtlich von technischen Erweiterungen bzw. Maßnahmen zur Automatisierung durchführen können.

3.3.3 Risikobewertung von Mensch und Maschine

Vor allem der Automotive-Bereich fordert u.a. für den gesamten Herstellprozess eine Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA). Die FMEA kommt aus dem Bereich des Risikomanagements und kann über ein System (Baugruppe), eine Konstruktion (Produkt), ein Werkzeug und einen Fertigungsprozess durchgeführt werden [Wor96].

Mit der Prozess-FMEA wird jeder Fertigungsschritt auf Eignung zur Herstellung der benötigten Produkteigenschaften untersucht. Dabei sind für alle möglichen Fehler, die bei der Herstellung des

Produktes auftreten können, entsprechende Maßnahmen zu Vermeidung oder Entdeckung zu planen [SFH07].

Das Ergebnis einer Fehlerbewertung ist die Risikoprioritätszahl als Produkt aus Bedeutung der Fehlerfolge, der Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache und der Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers. Die Faktoren werden jeweils mit einer Zahl zwischen eins und zehn bewertet [Wil07].

Eine eins entspricht einer geringen und zehn einer hohen Bedeutung bzw. Auftretenswahrscheinlichkeit.

Die Bedeutung einer Fehlerfolge bezieht sich auf das Ausmaß der Fehlerauswirkungen (meistens für den Endkunden des Produktes). Sicherheitsrelevante Themen werden häufig mit einer zehn bewertet.

Vergleicht man ein Handling bei der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Fehlers durch den Menschen mit einer Maschine, so wird der Mensch oftmals „fehleranfälliger“ bewertet. Damit erfolgt eine Vergabe einer höheren Zahl für manuelles Handling und die Risikoprioritätszahl steigt. Für die Entdeckungswahrscheinlichkeit hat eins eine hohe und zehn eine niedrige Erwartung. Auch hier wird mit zunehmender Verantwortung des Menschen (z.B. Sichtprüfung) die Entdeckungswahrscheinlichkeit kritischer als eine Maschine (z.B. Sensorprüfung) bewertet [Vos11].

In der Praxis wird eine Risikoprioritätszahl über 125 als kritisch eingestuft. Auftraggeber fordern dann Maßnahmen zur Risikosenkung. Weiterhin sollten Fehler mit einer Einzelbewertung von Auftretenswahrscheinlichkeit, Bedeutung oder Entdeckungswahrscheinlichkeit größer als acht ebenfalls weiter bearbeitet werden [SFH07]. Somit sind für manuelles Handling oft noch weitere Maßnahmen zur Durchführung oder Absicherung eines Prozesses bzw. der Qualität notwendig, was erhöhte Investitionen in Maschinen und Peripherie erfordert. Diese sollten bereits bei der Angebotsausarbeitung berücksichtigt und in die Kostenkalkulation mit aufgenommen werden.

3.3.4 Verfügbarkeiten von Fertigungssystemen

Für die Gestaltung von Fertigungskonzepten besteht die Möglichkeit, die Fertigungssysteme autark (z.B. ein Reel-to-Reel System) oder miteinander gekoppelt (z.B. Reel-to-Line System) zu betreiben. Bei autarken Fertigungssystemen wirken sich kleinere Störungen im Produktionsablauf in der Regel nicht auf die zeitlich später folgenden Fertigungssysteme aus, sondern nur auf den betroffenen Produktionsschritt. Sind die Fertigungssysteme aber im Fertigungsfluss miteinander verknüpft, besitzen diese einen höheren Automatisierungsgrad und sind gegenseitig voneinander abhängig. Gibt es beispielsweise eine Störung in Form von einer Produktionsunterbrechung an einer Maschine oder einer Handlingseinrichtung, so kommt es zum Stillstand der gesamten Produktionsanlage.

In der Industrie beziehen sich die Anbieter (z.B. Sondermaschinenbauer) von schlüsselfertigen Fertigungssystemen oft vertraglich auf die Norm VDI 3423 mit einer Technischen Verfügbarkeit größer 85% für eine Produktionsanlage. Die Technische Verfügbarkeit gibt den prozentualen Anteil der Zeit an, in der die Produktionsanlage ohne technische Mängel mit vollem Leistungsvermögen betrieben werden kann [VDI02].

Bei gekoppelten Fertigungssystemen ohne Materialspeicher ist die Gesamtverfügbarkeit das Produkt aus seinen Einzelverfügbarkeiten. Werden z.B. sechs Einzelsysteme mit einer Verfügbarkeit von jeweils 93% hintereinander verkettet, so ergibt sich ein Wert für die Gesamtverfügbarkeit von ca. 65%. Das bedeutet, dass das verkettete System nur zu 65% seiner eingeplanten Zeit auch wirklich einsatzfähig ist und zur Produktion eingesetzt werden kann [Küh06] und zugleich eine längere Zeit als geplant für die Produktion belegt werden muss, um die erforderliche Anzahl an Teilen produzieren zu können. Weiterhin entstehen durch längere Belegungszeiten von Produktionsanlagen zusätzliche Kosten, z.B. für das Bedienpersonal, welches ebenfalls längere Zeit zu Produktionszwecken eingesetzt werden muss. Es ist u.a. empfehlenswert, für verkettete Fertigungssysteme bereits bei der Konzeption angemessene Teilepuffer zwischen den einzelnen Fertigungsstufen zu berücksichtigen, um zumindest kurze Stillstände kompensieren zu können.

Die Technische Verfügbarkeit ist somit ein wichtiger Einflussfaktor hinsichtlich der Kostenkalkulation für die Fertigungskonzepte und fließt in die Modellbetrachtung mit ein. Das Thema Verfügbarkeit von Fertigungssystemen wird in einem späteren Kapitel im Zusammenhang mit der Effektivitätsbewertung noch weiter detailliert.

3.3.5 Produktverhalten nach dem Spritzgießprozess

Die Erwartung, bereits beim ersten Prozessdurchlauf den Serienstand zu erhalten, drängt sich aus Zeit- und Kostengründen immer mehr in den Vordergrund. Ebenso möchten die Hersteller von Kunststoff-Metall-Bauteilen sich vom „trial-and-error-Prinzip“ wegbewegen und proaktiv Qualität steigern sowie Risiken senken.

Doch speziell kundenspezifische Produkte unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht voneinander, so dass kaum auf Erfahrungswerte von ähnlichen Produkten zurückgriffen werden kann. Die Abstimmung zwischen Produkt, Maschine und Werkzeug eines Fertigungssystems ist notwendig, aber auch das Zusammenspiel von allen Systemen im gesamten Fertigungskonzept ist erforderlich und daher aufwendig. Einer Umfrage zufolge sind in der Regel drei bis fünf Korrekturschleifen für die Abmusterungen bis zur Serienreife notwendig [KB01].

Um die Zusammenhänge des Produktverhaltens im Fertigungsprozess besser verstehen zu können, sind Kenntnisse bzgl. Schwindung und Verzug erforderlich.

Für Kunststoffteile wird die Schwindung als „Unterschied zwischen einem beliebigen Maß der Werkzeugkavität und des Formteils bezogen auf das Werkzeugmaß“ definiert und resultiert aus dem Zusammenhang von Druck, Temperatur und dem spezifischen Volumen des Kunststoffs [MMM07]. Dieser Zusammenhang wird im pvT-Diagramm dargestellt. Durch die Schwindung ergeben sich während und nach dem Spritzgießprozess am Produkt durch die Volumenkontraktion des Kunststoffs geometrische Veränderungen, die in Abbildung 3-4 im Zusammenhang mit der Zeit zu finden sind.

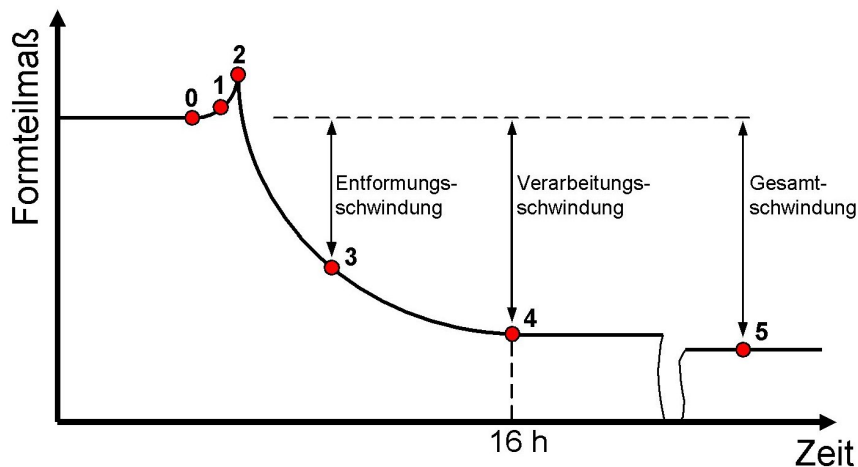


Abbildung 3-4: Zeitlicher Schwindungsverlauf nach [MMM07]

Der Punkt null stellt ein Maß im kalten Spritzgießwerkzeug dar. Durch die notwendige Erwärmung des Werkzeuges vergrößert sich das Maß in der Kavität (Punkt eins) bis unter Schließkraft und Nachdruck der Punkt zwei erreicht wird. Direkt nach der Entformung des Bauteils aus der Kavität kann die Entformungsschwindung (Punkt drei) ermittelt werden.

Nach 16 Stunden wird die Verarbeitungsschwindung (Punkt vier) erreicht. Die DIN 16901 definiert die Verarbeitungsschwindung als Unterschied eines Werkzeugmaßes bei $23 \pm 2^\circ\text{C}$ und dem Maß am Formteil nach seiner Herstellung sowie nach einer Lagerung von 16 Stunden im Normklima gem. DIN 50014-23/50-2 und anschließender, unmittelbarer Messung [DIN82]. Selbst nach langer Zeit z.B. durch Temperatureinflüsse können noch Nachschwindungen entstehen, die nachträgliche Maßänderungen am Formteil bewirken [Bec94]. Die Summe aus Verarbeitungs- und Nachschwindung ergibt die Gesamtschwindung (Punkt fünf).

Die Schwindungsrichtungen treten als Längs- und Querverschwindung zur Fließrichtung der Kunststoffschmelze auf, führen bei unterschiedlicher Ausprägung zum Verzug des Bauteils und sind u.a. durch die Spritzgießverarbeitung beeinflussbar (siehe Abbildung 3-5) [DEE05].

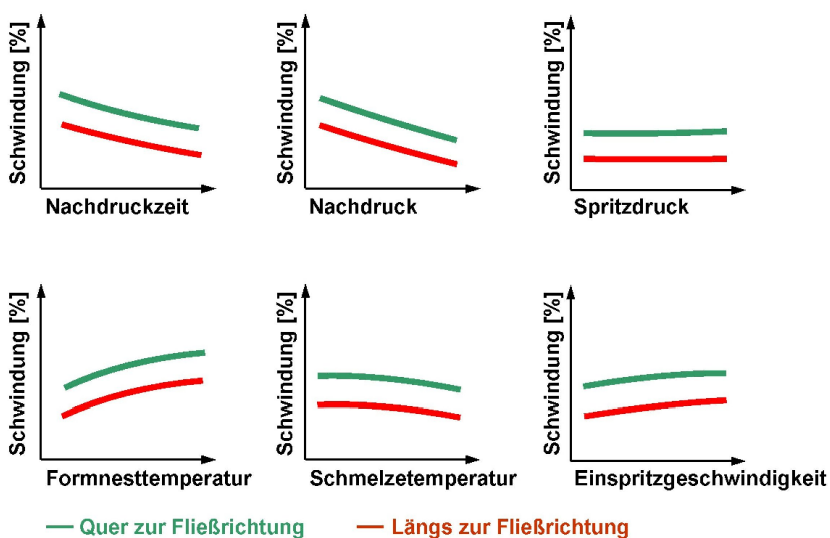


Abbildung 3-5: Verarbeitungsverhalten der Schwindung nach [DEE05]

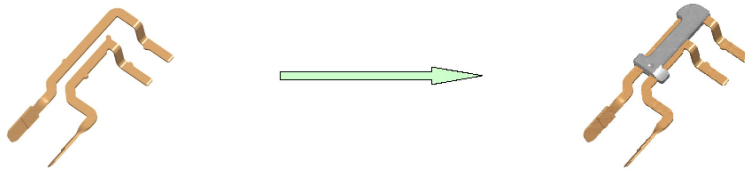
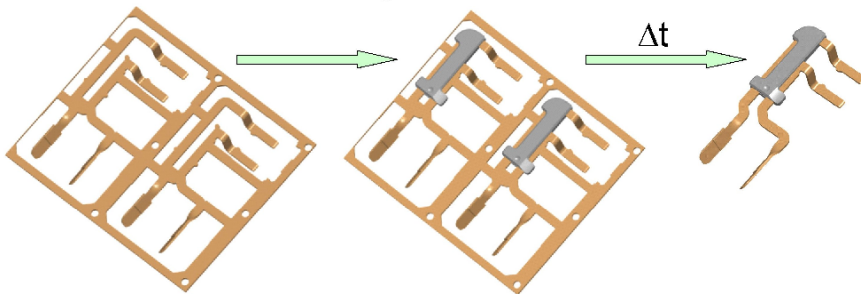
Die Werkstoffauswahl hat ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf das Schwindungsverhalten. Amorphe Kunststoffe besitzen ein Schwindungsniveau von ca. 0,3% bis 0,9%, teilkristalline Kunststoffe liegen bei ca. 0,4% bis 3% [EEH08]. Beide Arten besitzen im Schmelzbereich das gleiche Verhalten hinsichtlich ihrer linearen Abhängigkeit vom spezifischen Volumen zur Temperatur. Im Feststoffbereich nimmt das spezifische Volumen durch die Kristallisationsvorgänge von teilkristallinen Werkstoffen exponentiell ab. Für amorphe Werkstoffe bleibt der lineare Zusammenhang im Feststoffbereich erhalten. Das Materialverhalten kann durch eine Verstärkung mit Glasfasern beeinflusst werden. Die Fasern besitzen eine höhere Steifigkeit sowie eine geringere Wärmeausdehnung als der Kunststoff, was folglich in Orientierungsrichtung der Faser zu einer reduzierten Schwindung führt [MMM07].

Die Geometrie des Formteils führt zu zusätzlichen Ausprägungen von Schwindung und Verzug, wenn unterschiedliche oder zu dicke Wandstärken, Masseanhäufungen, scharfe Ecken und Kanten vorhanden oder Rippen nicht kunststoffgerecht gestaltet sind. Weiterhin können die Lage, Art und Größe des Angusses bzw. des Anschnittes sowie die thermische Auslegung des Werkzeuges die Schwindung beeinflussen [SK04].

Bei der Inserttechnik gibt es weitere Einflüsse auf die Schwindung. Das Einlegeteil besitzt einen niedrigeren Längenausdehnungskoeffizienten und eine niedrigere spezifische Wärmekapazität sowie eine höhere Wärmeleitfähigkeit als der Kunststoff [MBL95]. Das Insert behindert die flüssige Schmelze beim Füllen der Kavität und verbundene Leiterbahnen versteifen das Bauteil. Als Folge entstehen zusätzliche Eigenspannungen im Bauteil, welche zu Verzügen und Spannungsrissen am Teil führen können [ST09].

Die möglichst genaue Vorhersage des Schwindungs- und Verzugsverhaltens ist für die Auslegung des Spritzgießwerkzeuges entscheidend, damit das Kunststoff-Metall-Bauteil mit den geforderten Maßen auch hergestellt werden kann. Zudem ist es bei der Planung und Auslegung von Fertigungskonzepten wichtig, welche Fertigungsschritte nach dem Spritzgießen durchgeführt und zu welchem Zeitpunkt diese ausgeführt werden sollen. Es stehen mehrere Möglichkeiten zur Produktauslegung und Prozessgestaltung zur Verfügung. In den zuvor beschriebenen Kapiteln wurde dargestellt, dass es unterschiedliche Auswahlmöglichkeiten gibt, den gesamten Fertigungsprozess zu gestalten. Beim Einsatz von losen Metallinserts (WT-Wechseltisch System) wird durch die Inserttechnik in der Regel direkt das Fertigprodukt hergestellt (siehe Abbildung 3-6 oben).

Beim Spritzgießen am Stanzgitter ist nach dem Spritzgießprozess noch ein Stanzprozess zum Trennen der Verbindungsstege notwendig, um Leiterbahnen voneinander zu separieren. Der Stanzvorgang kann, je nach Wahl des Fertigungskonzeptes, unmittelbar (Hybrid-Werkzeug System) oder nach Minuten (Reel-to-Line System) aber auch erst Tage nach dem Entformen (Reel-to-Reel System) stattfinden. Die metallischen Verbindungen im Bauteil und zum Stanzgitterstreifen bewirken eine Versteifung und beeinflussen zeitlich begrenzt die Schwindung sowie den Verzug. Allgemein gesehen tritt durch den nachgelagerten Stanzprozess eine Designänderung am Produkt nach einer Zeit Δt ein (siehe Abbildung 3-6 unten).

Inserttechnik - lose Inserts**Inserttechnik - Inserts am Stanzgitter****Abbildung 3-6: Prozessunterschiede an einem Beispiel (Quelle: Inovan)**

Auf dem Markt gibt es mehrere Softwareprogramme zur Durchführung von Spritzgießsimulationen, die Einlegeteile bei der Berechnung mit berücksichtigen können. Hierzu gehören u.a. CADMOULD, Moldex3D, Moldflow, Sigmasoft und Simpoe-Mold (vgl. [Dua10, Fil10, Kal02, KS00, N.N.09b, N.N.10a]). Die Möglichkeiten der verfügbaren Tools sind unterschiedlich. Idealerweise kann das Simulationstool das Produkt und das Spritzgießwerkzeug inkl. Materialkennwerten und Kühlkanäle als Datenfile verarbeiten und Prozessparameter wie Temperaturen, Zeiten, Drücke, Geschwindigkeiten, Profile, etc. in der Simulation berücksichtigen.

Als Ergebnisse sind Erkenntnisse über die thermischen Zustände im Werkzeug und am Produkt interessant. Das Füllverhalten, der Erstarrungsfortschritt, die Druck- und Strömungsverläufe der Schmelze, Fließfronten sowie Bindenähte und Glasfaserverläufe können wertvolle Informationen für die Wahl des Anspritzpunktes oder notwendige Designoptimierungen bzw. kritische Entlüftungszonen im Werkzeug liefern. Aber auch das Verhalten des Inserts während des Einspritzvorgangs im Hinblick auf die Temperatur oder die Position einzelner Leiterbahnen sind einsehbar. Der Spritzdruck sollte die Leiterbahnen nicht bis zum elektrischen Kurzschluss verbiegen bzw. einen Sicherheitsabstand der Leiterbahnen untereinander gewährleisten.

Simulationsuntersuchungen an 3D-Modellen von Mehrkomponenten-Bauteilen zeigen, dass zum einen verschiedene Materialien der Inserts (z.B. aus Metall oder Kunststoff) und zum anderen verschiedene Produktgeometrien (z.B. Quadrat- oder U-Form) auch zu unterschiedlichen Simulationsergebnissen für Schwindung und Verzug führen (vgl. [CPH04, HYT06]).

Das simulierbare Spektrum von auswählbaren Materialien und Produktgeometrien ist groß. Doch das integrierte Simulieren von Spritzgieß- und Stanzprozessen inkl. einer Designänderung am Produkt (durch den nachgelagerten Stanzprozess) ist bis heute aber noch nicht möglich [Dua10].

Es gibt beim Simulieren von Kunststoff-Metall-Bauteilen aber auch zusätzliche Einflüsse, welche den Vergleich der Realität mit dem Simulationsergebnis beeinträchtigen.

Das Insert befindet sich in der Realität in einer Spielpassung in den Dichtzonen des Spritzgießwerkzeugs. Die Definition der Einspannbedingungen des Inserts in der Kavität sowie die Abschätzung der Haftung und des Wärmeübergangs von Insert zum Kunststoff und zum Werkzeug

sind somit für die Simulation von Bedeutung, vor allem wenn das Werkzeug noch nicht als CAD Modell vorliegt.

Nicht alle in der Realität auftretenden Wechselwirkungen können von der Simulation mit ins Kalkül gezogen werden. Die Materialkennwerte der eingesetzten Werkstoffe sind zwar in der Regel in Materialdatenbanken der Materialhersteller verfügbar. Jedoch unterliegt deren Herstellprozess ebenfalls gewissen Toleranzen, die die Werkstoffeigenschaften beeinflussen. Diese können dann zu unterschiedlichen Produktverhalten bei der Weiterverarbeitung führen [LDF06]. Das Metallinsert erfährt in der Praxis ebenfalls Einflüsse, die nur schwierig in einer Simulation Berücksichtigung finden. Die Stanzstempel nutzen sich während des Stanzprozesses leicht ab und sorgen vor allem in den Dichtbereichen über eine gewisse Zeit für leichte Schwankungen. Komplexe dreidimensionale Stanz-Biegeteile weisen nicht immer die gewünschte Reproduzierbarkeit auf. Auch die Dicke des Halbzeugs variiert im Bereich von wenigen Hundertstel Millimeter und sorgt somit für unterschiedliche Insert-Volumen im Spritzgießwerkzeug.

Die Ergebnisdarstellung des Teilezustandes zu einem beliebigen Zeitpunkt nach der Entformung ist bis heute nur von wenigen Softwareherstellern auswertbar [Dua10]. Der Vorteil der Erkenntnis über den Zusammenhang des Produktverhaltens über die Zeit kann nicht nur für das Produkt, sondern auch für nachträgliche Änderungen am Fertigungsprozess bzw. an Maschinen oder Peripherie hinsichtlich Aufwand und Kosten entscheidend sein. Für die Auswahl und Planung von z.B. Prüfsystemen sind die Erkenntnisse des Produktverhaltens nach dem Spritzgießen wichtig. In den ersten Minuten nach dem Entformen des Produktes aus der Spritzkavität ändert sich die Maßhaltigkeit besonders stark. Bei bereits realisierten Produkten und Prozessen lassen sich zur Untersuchung der Maßhaltigkeit Zeitstudien durchführen, um den Zeitpunkt für eine Messung mit größter Messsicherheit zu ermitteln [Wor96]. Bei der Angebotsausarbeitung für kundenspezifische Produkte liegen vergleichbare Erfahrungen über das Produktverhalten nur selten vor, um die zeitliche Abfolge für Fertigungssysteme optimal zu planen.

Auch wenn das Fertigprodukt als 3D-Modell vorliegt, sollte eine Simulation in der Phase der Angebotsausarbeitung aus Zeit- und Kostengründen nur bedingt unterstützend eingesetzt werden. Die Produktzwischenstufen sowie die Werkzeuge sind in dieser Phase noch nicht vorhanden und daher fließen zu diesem Zeitpunkt in eine Simulation lediglich vereinfachte Annahmen ein. Damit bieten Simulationsergebnisse in dieser frühen Phase lediglich die Basis einer ersten Risiko- und Herstellbarkeitsanalyse, welche als Diskussionsgrundlage mit dem Auftraggeber bzgl. des Produktdesigns genutzt werden können. Die Zykluszeit ist ein entscheidender Einflussfaktor hinsichtlich der Maschinen- und Personalkosten bei der Modellbetrachtung. Eine Verifizierung der geplanten Zykluszeit mit grob abgeschätzten Spritzgießparametern mittels einer Simulation, ist für kundenspezifische Produkte selbst unter diesen vereinfachten Bedingungen empfehlenswert.

Ist das Produktdesign abgestimmt und der Auftrag vergeben, ist eine nachträgliche Änderung am Produkt nur noch in Ausnahmefällen möglich. In der Realisierungsphase kann die Simulation genutzt werden, um vorrangig die Planung der Werkzeuge und des Fertigungsprozesses zu optimieren. So sollten bei der Feinplanung des Fertigungskonzeptes parallel zur Konstruktion der Zwischenprodukte und Werkzeuge auch die Produktionsprozesse integriert betrachtet werden. Es

können bewusste Vorkehrungen am Werkzeug vorgenommen werden, um sich im Vorfeld auf das Produktverhalten im Prozess vorzubereiten. Es besteht beispielsweise die Möglichkeit an bestimmten Bereichen in der Werkzeugform bewusst Material vorzuhalten, um die Erkenntnisse nach einer Werkzeugerprobung und darauf folgender Teilevermessung final in das Spritzgießwerkzeug einarbeiten zu können. Daher ist in der Realisierungsphase die Simulation ein gutes Hilfsmittel, um mit möglichst wenig Korrekturschleifen die notwendige Qualität zu erhalten sowie schneller und vor allem kostengünstigere Werkzeuge bereits im Angebot anbieten zu können. Die Werkzeugkosten sind ebenfalls Bestandteil der Modellbetrachtung und fließen in die Kostenermittlung des Fertigungskonzeptes mit ein.

Schlussendlich wird nur eine wechselseitige Betrachtung von Produkt, Materialien, Maschinen, Werkzeugen und dem Gesamtprozess zu guter Serienqualität führen.

3.3.6 Fazit zu Prozessabfolgen und Automatisierungsmaßnahmen

Bei der Planung und Auslegung von verketteten Fertigungsschritten bekommt der langsamste Einzeltakt eine besondere Bedeutung, weil dieser den Gesamttakt einer Fertigungsanlage vorgibt. Das Automatisieren von Montage- und Fertigungsschritten erfordert einen erhöhten finanziellen Einsatz an technischen Maschinen und Peripheriegeräten.

Es ist notwendig, die Betrachtung und Bewertung von Produkt, -funktion, -qualität, Fertigungsprozess, Anlagenflexibilität, Stückzahl, Technischer Verfügbarkeit sowie den Kosten im Modell integriert vorzunehmen. Nur so kann das technisch und wirtschaftlich optimale Fertigungskonzept ermittelt und dem Kunden angeboten werden.

Simulationsprogramme sind in der Angebotsphase bei der Konzepterstellung von Fertigungsabfolgen und Produktdesign nur bedingt als planungsunterstützende Tools einsetzbar, bieten aber im Rahmen der Realisierungsphase bei der Feinplanung und der zunehmenden Konkretisierungen von Details mehr Möglichkeiten.

Eine hohe Automatisierung bedeutet in der Regel auch eine hohe Kapitalbindung in einer sehr frühen Projektphase. Die Hochlaufkurven bzgl. der Jahresstückzahlen können steil oder weniger steil verlaufen. Oder das Produkt findet in einer nachträglichen Entscheidung in mehreren Automobilplattformen eine Anwendung, dass sich die Stückzahlen schnell vervielfachen. Daher kann es wirtschaftlich von Vorteil sein, Automatisierungen auch in mehrstufige Phasen, abhängig von den Stückzahlen, zu unterteilen. Dadurch entsteht eine angepasste Kapitalbindung an die Stückzahlsituation. Es gibt aber auch den entgegengesetzten Fall, wo Projekte bzw. Produkte abgebrochen werden müssen. Dann können die produktspezifisch hergestellten Einrichtungen keine Anwendung mehr finden.

Allgemein ist zu empfehlen, dass zum Ende der Wertschöpfungskette der Automatisierungsgrad und die maschinellen Prüfungen am höchsten sein sollten. Die wichtigste Prämisse ist es, dem Kunden Teile nach seiner Spezifikationsvorgabe zu liefern. Somit besteht für das Unternehmen noch intern die Möglichkeit, Fehler selber zu entdecken, zu beheben und Prozesse zu verbessern. Um als Lieferant aber dauerhaft am Markt bestehen zu können, ist vor allem eine Durchgängigkeit von hohem Qualitätsniveau, eine hohe Systemverfügbarkeit und eine maximale Leistung durch alle Prozessstufen notwendig.

In dem folgenden Kapitel wird für die Modellanwendung eine Effektivitätsbetrachtung von Fertigungssystemen durchgeführt und darauf aufbauend u.a. die Berechnung der Maschinenkosten dargestellt. Damit ermöglicht das Modell die für die Planung von Fertigungskonzepten notwendige wirtschaftliche Entscheidungsgrundlage mittels einer fundierten Kostenkalkulation, die Bewertung und Gegenüberstellung von Automatisierungsmaßnahmen, in Abhängigkeit von den auftragsspezifischen Rahmenbedingungen, durchzuführen.

4 Bewertung von Fertigungskonzepten

In diesem Kapitel befinden sich die wichtigsten Variablen und Kennwerte zur Modellbetrachtung für die Bewertung von Fertigungskonzepten für kundenspezifische Kunststoff-Metall-Bauteile mit auftragspezifischen Rahmenbedingungen. Im vorangegangenen Kapitel wurden die Produkte, die Inserttechnik, die Fertigungssysteme und deren Möglichkeiten der Zusammenstellung zu einem Fertigungskonzept vorgestellt.

Abbildung 4-1 zeigt die Modellübersicht und die notwendigen Eingangsinformationen in das Modell sowie die Ergebnisse aus der Modellanwendung, welche im Folgenden beschrieben und anhand eines Fallbeispiels erläutert werden.

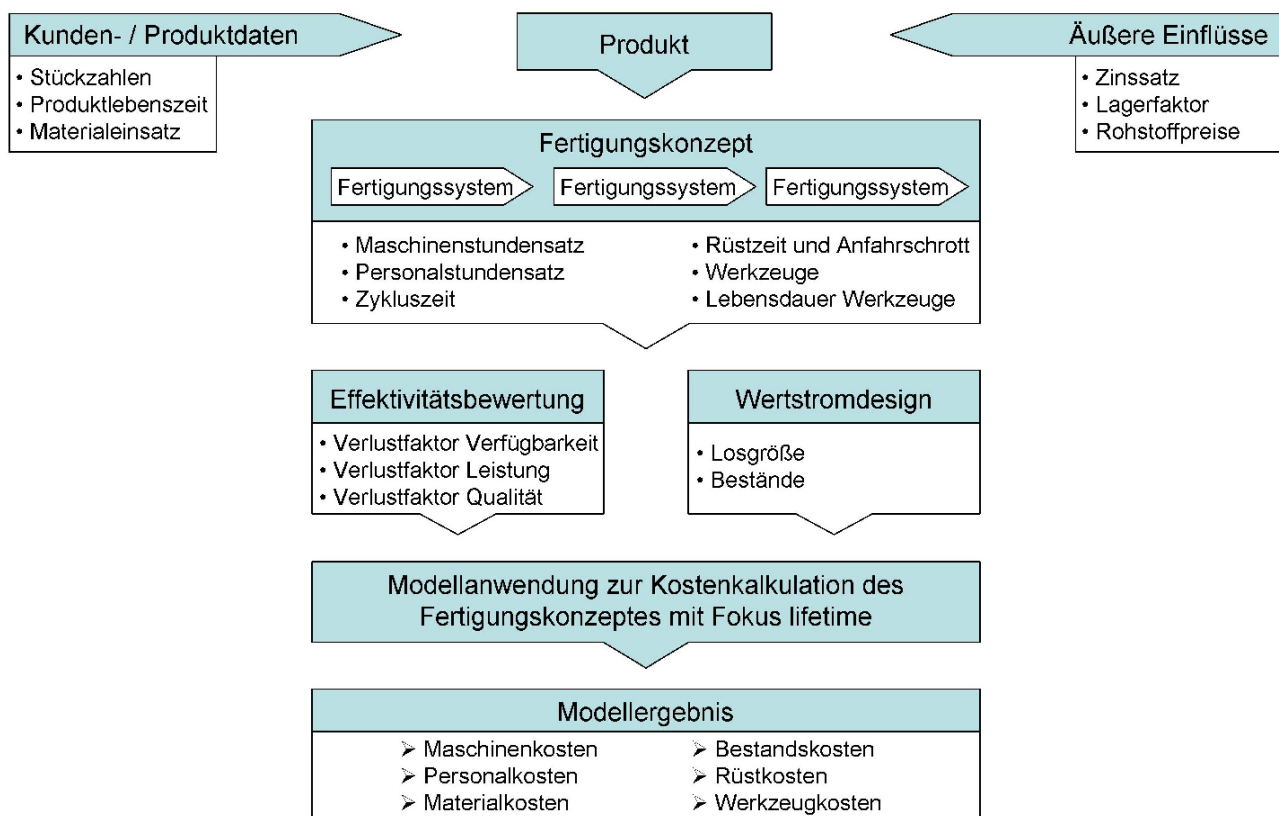


Abbildung 4-1: Modellübersicht

Das Produkt wird charakterisiert durch die auftragspezifischen Stückzahlen, die Produktlebenszeit und die verwendeten Materialien. Weiterhin nehmen der Zinssatz, die Lagerkosten und die Rohstoffpreise Einfluss auf die Kostenkalkulation des Produktes. Das ausgewählte Fertigungskonzept mit seinen Fertigungssystemen beinhaltet zur Produktherstellung Kostenstrukturen von Maschinen und Personal, Prozessdaten hinsichtlich der Vorbereitung der Produktion sowie der Produktionsgeschwindigkeit und die zur Prozessdurchführung erforderlichen Werkzeuge.

Jedes Fertigungssystem wird durch unterschiedliche Verlustfaktoren auf Effektivität bewertet sowie mittels Wertstromdesign visualisiert, um die Losgrößen und Bestandsmengen zu ermitteln.

Diese Informationen fließen anschließend in die Kostenkalkulation bei der Modellanwendung ein und als Modellergebnis werden die Kosten im Bezug auf die gesamte Produktlebenszeit hinsichtlich Maschinen, Personal, Material, Beständen, Rüsten und Werkzeugen ausgegeben.

Mit diesem Modell werden damit ganzheitliche Analysen und Optimierungen sowie Vergleiche und Gegenüberstellungen von Fertigungskonzepten möglich.

4.1 Effektivitätsbetrachtung mittels Net Equipment Effectiveness

Die Effektivität bewertet einen Sachverhalt im Hinblick des erbrachten zum geplanten Output. Der aufgewendete Ressourceneinsatz wird dabei nicht mit einbezogen. Effizienz hingegen beschreibt einen Sachverhalt im Verhältnis von Output zu Input [Bra09]. Dennoch stellt in den meisten Fällen eine hohe Effektivität die Grundlage für eine hohe Effizienz dar. Im ersten Zuge wird die Effektivität von Fertigungssystemen bewertet und genutzt, um anschließend mit weiteren Kriterien die Kosten von Fertigungskonzepten zu ermitteln. Das Fertigungskonzept, welches mit geringstem finanziellem Input den erforderlichen Output hervorbringt, ist das effizienteste.

Um die Effektivität von Fertigungsprozessen zu ermitteln, kann die aus der Methode Total Productive Maintenance (TPM) bekannte Kennzahl Overall Equipment Effectiveness (OEE) genutzt werden, welche auch unter dem deutschen Begriff Gesamtanlageneffektivität (GAE) geführt wird.

TPM hat zum Ziel, Produktionsanlagen bzw. Fertigungsprozesse in ihrer Effektivität sowie Effizienz zu steigern, indem Produktionsverluste verringert werden. Es beinhaltet weit mehr Themen als die reine Instandhaltung. Dabei ist der OEE ein Baustein im Gesamtkonzept von TPM (vgl. [BS10, BW08]).

TPM wurde ab 1960 am „Japan Institute for Plant Maintenance“ ausgearbeitet. Der Mitgründer des Institutes Seiichi Nakajima hat hier auf den Erfahrungen von dem Automobilhersteller Toyota das TPM-Konzept entwickelt (vgl. [Bru08, Rei08]).

Dabei wurden sechs Verlust-Arten identifiziert, welche in drei Verlust-Faktoren unterteilt sind (vgl. [Sch10b, Shi92, SCJ09]). Diese beziehen sich hier immer auf ein Fertigungssystem und führen später bei der Modellanwendung zu einer Beeinflussung von Maschinen-, Personal-, Material-, Bestands- sowie Rüstkosten.

- Zeitverluste (Verfügbarkeitsverluste; V)

Dieser Verlustfaktor beschreibt die Zeit, in der ein Prozess aus unterschiedlichsten Gründen nicht durchgeführt werden kann und dadurch nicht verfügbar ist. Das Rüsten und Einrichten eines Fertigungsprozesses beinhaltet Zeitverluste bis die Produktion starten kann. Dazu zählen u.a. das Einsetzen und Einstellen der Stanz- und Spritzgießwerkzeuge. Speziell die Spritzgießwerkzeuge müssen auf Betriebstemperatur aufgeheizt werden. Die Abstimmung von Maschinen und den notwendigen Peripherien bzw. Handlingssystemen sowie die Prüfung der Teilequalität gehören ebenfalls dazu.

Weiterhin zählen zu diesem Faktor die ungeplanten Stillstände (über zehn Minuten), wie z.B. Störungen der Fertigungsanlage, ein gebrochener Einsatz im Werkzeug, das Fehlen von Material oder Personal, etc.

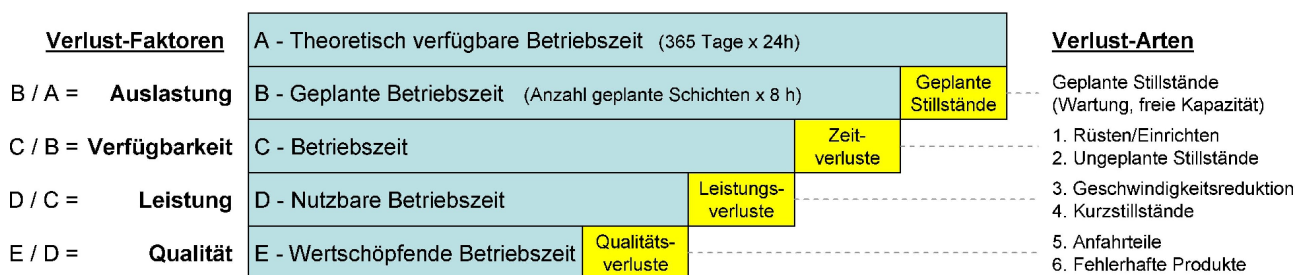
- Leistungsverluste (L)

Werden Prozesse mit niedrigerer Geschwindigkeit betrieben als geplant, verringert sich bei gleicher Zeitvorgabe der Output. Als Beispiel dient hier das WT-Umlaufsystem, bei dem z.B. zu wenige Werkstückträger im Umlauf sind und sich dadurch die Gesamtzykluszeit verlängert. Oder beispielsweise das Prüfsystem gibt eine Störmeldung an, die zum kurzfristigen Anlagenstillstand (unter zehn Minuten) führt.

- Qualitätsverluste (Q)

Qualitätsverluste beinhalten fehlerhafte Teile im Prozess sowie Anfahrteile beim Rüsten und Einrichten.

Die Verlust-Faktoren werden miteinander multipliziert und ergeben den OEE (siehe Abbildung 4-2).



Total Effective Equipment Productivity

$$\text{TEEP} = \text{OEE} \cdot \text{Auslastung} \\ = E / A$$

Overall Equipment Effectiveness

$$\text{OEE} = \text{Verfügbarkeit} \cdot \text{Leistung} \cdot \text{Qualität} \\ = E / B$$

Net Equipment Effectiveness

$$\text{NEE} = \text{Verfügbarkeit (ohne Rüsten, ohne Einrichten)} \cdot \text{Leistung} \cdot \text{Qualität (ohne Anfahrteile nach Rüstvorgang)}$$

Abbildung 4-2: Kennzahlen zur Bewertung der Effektivität nach [Erl10, Gul09]

Der OEE wird in der Regel in Prozent dargestellt und kann zwischen 0% und 100% liegen. Zur Erklärung folgt ein Beispiel. Ein Fertigungsprozess hat 20% Zeitverluste, dadurch sinkt die Verfügbarkeit des Prozesses von 100% auf 80%. Aufgrund von 5% Leistungsverlusten reduziert sich die Effektivität des Prozesses auf 76% ($=0,80 \times 0,95 \times 100\%$).

Weiterhin hat der Prozess im Betrieb einen Serienausschuss von 4%. Dies führt zu einem OEE von nur noch knapp 73% ($=0,80 \times 0,95 \times 0,96 \times 100\%$).

Weltweit durchgeführte Studien zeigen, dass die meisten Unternehmen bei einem OEE von 65% bis 85% liegen. Unternehmen über 85% werden als sehr gut eingestuft [Sch10b].

Der Vergleich zwischen der OEE und der in Kapitel 3.3.4 erklärten Technischen Verfügbarkeit gestaltet sich wie folgt. Die VDI Norm distanziert sich bewusst von der Einbeziehung der Leistungs- und Qualitätsverluste. Das Erfassen bezieht sich vorrangig auf die Zeitverluste [VDI02]. Es gibt auch die Möglichkeit, die Auslastung von Maschinen mit in die Kennzahl der Effektivität zu integrieren [Han01]. Hierzu werden geplante Stillstände mit einbezogen und inklusive Verlust-Faktor Auslastung dargestellt. Dieser Faktor wird mit der OEE multipliziert. Das Ergebnis ist die Total Effective Equipment Productivity (TEEP), auf Deutsch die Totale Effektive Anlagenproduktivität.

Ist z.B. eine Produktionsanlage an 365 Tagen lediglich für ein Drittel der Zeit zur Produktion eingeplant, so ist die Anlage zu 33,3% ausgelastet. Führt man das Beispiel mit dem vorangegangenen OEE fort, so ergibt sich ein TEEP von 24% ($=0,73 \times 0,33 \times 100\%$).

Alle bislang aufgeführten Kennzahlen haben Defizite für die gewünschte Modellauswahl.

Die Technische Verfügbarkeit aus der VDI 3423 ist ungeeignet, da sie nicht alle Verlustfaktoren beinhaltet und keinen Wert in Verbindung des Outputs eines Fertigungsprozesses liefert [GKS07].

Der TEEP ist unzweckmäßig, weil für den noch folgenden Maschinenstundensatz die Auslastung explizit aus produktspezifischer Sicht definiert wird.

Der OEE ist ebenfalls unangebracht, da die Rüstzeiten und die Anfahrteile nach Rüstvorgängen eine Abhängigkeit von der Häufigkeit der Rüstvorgänge aufweisen. Kleine Fertigungslosgrößen führen bei gleich bleibender Rüstdauer je Rüstvorgang zwangsweise zu einem niedrigeren OEE.

Einen zusätzlichen OEE-Ansatz hat [Jab08] ausgearbeitet. Er erweitert die OEE um einen weiteren Faktor, dem Innovationsgrad. Dieser stellt das Verhältnis von eingestellter zur maximal technisch realisierbarer Produktionsgeschwindigkeit dar. Dieser Ansatz wird hier nicht weiter verfolgt, weil er nicht die Defizite des klassischen OEE behebt.

Es gibt noch eine weitere Kennzahl, die sich rein auf Effektivität im Betrieb der Produktionsanlage konzentriert, die Net Equipment Effectiveness (NEE) (übersetzt die Netto Anlageneffektivität). Hier sind die geplanten Stillstände sowie die Zeitverluste durch Rüsten und Einrichten ausgeschlossen [Har07]. Ebenso die Anfahrteile nach Rüstvorgängen sind kein Bestandteil der NEE. Das bedeutet aber nicht, dass diese Elemente entfallen. Der Modellanwender wird sich später noch explizit mit der Rüstzeit pro Rüstvorgang und Anfahrteilen auseinandersetzen.

Als Zielgrößen für eine sehr gute NEE sollten die ungeplanten Stillstände unter 10% liegen. Leistungsverluste unterhalb von 5% sind notwendig, wenn die Qualitätsverluste bei 1% liegen. Die Ausschussteile müssen aber in der Produktion gefunden und aussortiert werden.

Dennoch gibt es einige Beanstandungen an der NEE, die man bei der Anwendung kennen sollte (welche aber auch bei den anderen obigen Kennzahlen zum Tragen kommen).

Die Verteilung der Verlust-Faktoren kann bei der Multiplikation zu einer falschen Interpretation führen, wenn man sich nur die NEE anschaut. Vor allem der Qualitätsfaktor wirkt sich finanziell durch die Materialkosten stark aus. Idealerweise kann bei einer ungewöhnlich hohen Anzahl von Ausschussteilen die Produktion unterbrochen und die Ursache untersucht werden. Das verlagert zwar Verluste von den Qualitäts- auf die Zeitverluste, schont aber Materialeinsatz und somit auch Materialkosten.

Wie eingangs des Kapitels erwähnt, beachtet die Effektivität nicht den Ressourceneinsatz. Daher ist es bei der reinen Betrachtung der NEE nicht ersichtlich, mit welchem Personaleinsatz der Output erzielt worden ist.

Der NEE bezieht sich auf wertschöpfende Prozesse, für gewöhnlich eines Fertigungssystems. Das gesamte Fertigungskonzept kann nicht über eine zusammenfassende Effektivitäts-Kennzahl dargestellt werden. Somit sind weitere Elemente notwendig, die es ermöglichen eine Beurteilung des Gesamtkonzeptes vorzunehmen.

Üblicherweise beginnen Unternehmen mit der Ermittlung von Effektivitätskennzahlen erst bei implementierten Serienprozessen. Hier lassen sich Verluste unter Serienbedingungen sammeln und auswerten. Es ist zwar leichter, nach der ersten Kennzahlenerhebung Missstände zu erkennen und Gegenmaßnahmen auszuarbeiten, es bleibt aber eine Reaktion auf ungewollte Situationen. Daher erhebt das entwickelte Modell den Anspruch, im Vorfeld die Verluste abzuschätzen und zu bewerten, und zwar zum Zeitpunkt der Ausarbeitung des Angebotes. Die Effektivität mit der Differenzierung der Verlust-Faktoren hat entscheidenden Einfluss auf die Kostenbewertung der Fertigungskonzepte. Zu diesem Zeitpunkt können noch zusätzliche Investitionen im Teilepreis mit einkalkuliert werden, die die Effektivität (unter Betrachtung der Effizienz) erhöhen.

4.2 Prozessbetrachtung mittels Wertstromdesign

Ein Wertstrom (englisch: value stream) beinhaltet alle Aktivitäten und Informationen die notwendig sind, um die Herstellung eines Produktes vom Rohmaterial des Lieferanten (bzw. dem Materialzustand im Wareneingang) über die Verarbeitung bis zum Versand der Fertigteile zum Kunden (siehe Abbildung 4-3) durchzuführen [JW02].

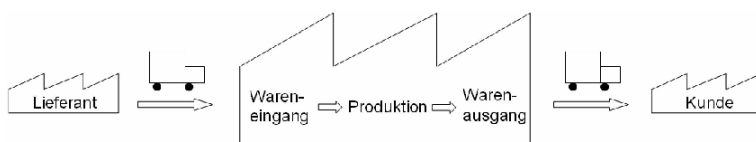


Abbildung 4-3: Skizzierter Wertstrom

Dabei werden sowohl wertschöpfende als auch nicht wertschöpfende Aktivitäten dargestellt. Wertschöpfende Aktivitäten beinhalten das direkte Bearbeiten des Produktes. Nicht wertschöpfende Aktivitäten hingegen beschreiben Aktivitäten, ohne direkt das Produkt zu bearbeiten z.B. Teile in das Werkzeug einlegen, ungenutzte Liegezeiten am Lager, Teile prüfen und sortieren oder den innerbetrieblichen Transport. Diese umfassende Betrachtung aller Aktivitäten im Fertigungskonzept wird bei der Modellanwendung nicht nur die Maschinen- und Personalkosten der einzelnen Fertigungssysteme, sondern auch das Darstellen von Rüst- und Bestandskosten ermöglichen.

Der Wertstrom soll die Gesamtheit aller Fertigungsprozesse sowie den Fertigungsfluss (Fertigungsreihenfolge) darstellen und keine Produktoptimierung [RS03].

Das Erkennen von Verschwendungen und Ableiten von Verbesserungspotentialen sind die Ziele der übersichtlichen Wertstrom-Darstellung. Das Wertstromdesign ist eine Methode zur ganz-

heitlichen Optimierung von Prozessen, die aus dem Toyota Produktionssystem heraus entstanden ist (vgl. [Gel11, Sys06]).

Taiichi Ohno entwickelte in den 50er Jahren das Toyota Produktionssystem, aus dem u.a. das „Just in Time“ Konzept entstanden ist [Zol06]. Aufgrund der Not von Raumknappheit und Kapitalmangel war sein Ziel, Verschwendungen abzuschaftern. Verschwendung wird im japanischen als „Muda“ bezeichnet und ist im Toyota Produktionssystem eine der drei Arten von Fehlleistungen. Die Verschwendungen teilte Ohno in sieben Kategorien ein (vgl. [Dol06, Sta10]):

1. Überproduktion

Überproduktion ist die schwerwiegendste Art von Verschwendung und bedeutet mehr Teile zu produzieren als bestellt worden sind. Dies führt wiederum zu erhöhten Verschwendungen an Maschinen, Personal, Beständen, Transport und Lagerflächen.

2. Wartezeiten

Wartezeiten entstehen, wenn z.B. ein Vorgängerprozess seinem Nachfolgeprozess keine Teile zur Verfügung stellen kann, oder wenn Maschinen, Bedienpersonal oder das einzusetzende Material nicht wie geplant verfügbar sind.

3. Transport

Das Transportieren von Teilen stellt keinen Beitrag zur Erhöhung der Wertschöpfung dar.

4. Überarbeitung / Nacharbeit

Ein Produkt über den Vertragsrahmen hinaus zu bearbeiten ist Verschwendung. Daher gilt, das Produkt nicht so genau wie möglich, sondern so genau wie nötig zu bearbeiten. Auch Nacharbeit von defekten bzw. Ersatzproduktionen führen zu ungewünschtem Mehraufwand.

5. Lagerbestand

Ein steigender Lagerbestand sorgt ebenfalls für erhöhte Lagerkosten.

6. Herstellung defekter Produkte

Qualitätsverluste sind grundsätzlich zu vermeiden. Sie senken nicht nur die Effektivität von Fertigungssystemen, sondern verursachen zusätzliche Materialkosten.

7. Bewegung der Arbeiter

Muss ein Mitarbeiter zur Erfüllung seiner Aufgabe unnötige Wegstrecken zurücklegen (z.B. Werkzeuge oder Zeichnungen holen), gilt dies als Verschwendung.

Im weiteren Verlauf werden für das Modell vorrangig die Verschwendungen Überproduktion, Wartezeiten, Lagerbestand und die Herstellung defekter Produkte einfließen.

Zur Visualisierung eines Wertstroms werden entsprechende Symbole verwendet. In Abbildung 4-4 sind die für diese Arbeit wichtigsten Symbole aufgeführt und in einem beispielhaften Aufbau des Wertstromdesign in Abbildung 4-5 dargestellt [ER05].

						Spritzgießen	M: 1 ; 50 €/h ZZ: 0,2s Rüstzeit: 3h
Unternehmen	Bestand	Lieferung per LKW	Manueller Info-Fluss	Elektronischer Info-Fluss	Material-Fluss	Prozess	Datenfeld vom Prozess

Abbildung 4-4: Wertstrom-Symbole nach [ER05]

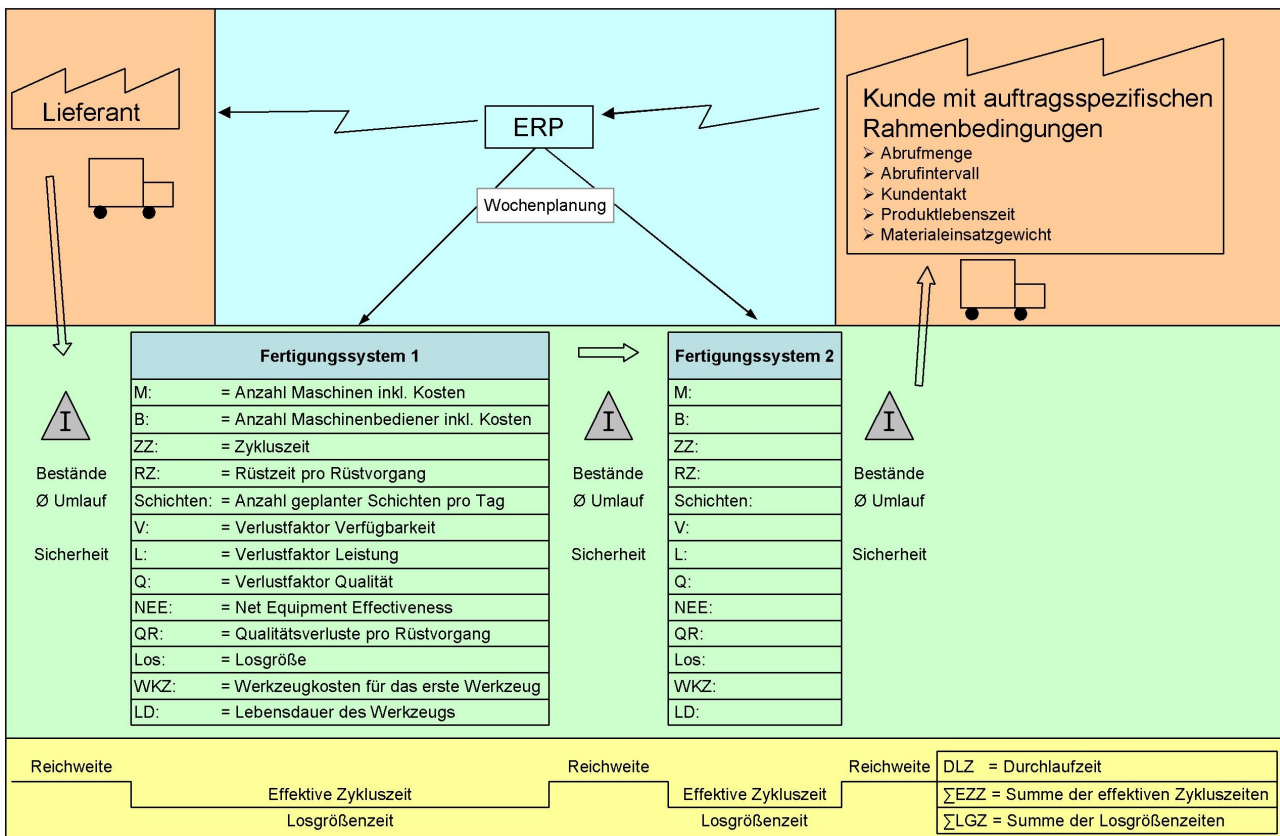


Abbildung 4-5: Aufbau eines Wertstromdesigns nach [ER05]

Das Wertstromdesign ist in Abbildung 4-5 zur Übersicht in farbige Bereiche unterteilt. In orange sind links der Lieferant des Rohmaterials und rechts der Kunde für das Fertigprodukt zu sehen. Das Rohmaterial vom Lieferanten wird in das Lager beim Hersteller für das Kunststoff-Metall-Bauteil eingelagert. Anschließend erfolgt im Unternehmen die Produktion mittels zweier Fertigungssysteme und die fertige Ware wird abgehend vom Lager an den Kunden geliefert.

Der blaue Bereich in Abbildung 4-5 beinhaltet alle Informationsflüsse, wobei diese hier exemplarisch zentral in ein Enterprise Resource Planning - System (ERP-System) zusammenfließen. Ein ERP-System ist eine Software, um den Informationsfluss mit externen Unternehmen und internen Abteilungen wie Produktion, Logistik, Personalwesen, Finanzwesen, etc. verwalten zu

können [Nek03]. Diese Rubrik ist sehr unternehmensspezifisch und wird daher an dieser Stelle nicht weiter vertieft.

Der Modellanwender wird durch die Eingabe der auftragsspezifischen Rahmenbedingungen (rechts oben) und durch die Bewertung der geplanten Fertigungssysteme (im grünen Bereich) in der Lage sein, die Kosten für ein Fertigungskonzept berechnen zu können.

Die dafür notwendigen Eingaben werden wie folgt definiert und mit Beispielen erklärt.

Im Feld der auftragsspezifischen Rahmenbedingungen vom Kunden sind der Kundentakt und die Produktlebenszeit (später auch als „lifetime“ bezeichnet) aufgeführt. Sie sind bedeutende Größen zur Kostenberechnung und Auswahl von Fertigungskonzepten. Jedes der geplanten Fertigungssysteme muss genügend Kapazitäten aufweisen, um die Kundenauftragsmenge fristgerecht herstellen zu können.

Die vom Kunden bestellte Teilemenge zu einem bestimmten Lieferzeitpunkt entspricht der Abrufmenge. Das Abrufintervall ist die zeitliche Differenz zwischen zwei Lieferzeitpunkten. Um Lagerkosten einzusparen, beziehen Auftraggeber zunehmend ihre Abrufmengen in kurzen Abrufintervallen (z.B. täglich).

Bestellt der Kunde beispielsweise 10.000 Teile in einem täglichen Abrufintervall (bei durchschnittlich 20 Arbeitstagen pro Monat), so sind pro Monat 200.000 Teile bzw. pro Jahr 2,4 Mio. Teile zu liefern.

Im Zusammenhang mit der geplanten Betriebszeit (vgl. auch Abbildung 4-2) des Herstellers kann der Kundentakt berechnet werden.

Die geplante Betriebszeit ist die Anzahl der geplanten Schichten pro Zeit multipliziert mit den Arbeitsstunden pro Schicht. In diesem Beispiel wird an fünf Tagen pro Woche jeweils mit drei Arbeitsschichten von je acht Arbeitsstunden gearbeitet.

Der Kundentakt entspricht dem Quotient aus geplanter Betriebszeit und der bestellten Abrufmenge, um die Kundennachfrage genau zum Bedarfszeitpunkt zu erfüllen [BS04a] und beträgt hier in der folgenden Beispielrechnung 8,64 Sekunden pro Teil.

$$\begin{aligned} \text{Kundentakt} &= \frac{\text{geplante Betriebszeit}}{\text{Abrufmenge}} = \frac{24 \frac{\text{h}}{\text{Tag}}}{10.000 \frac{\text{Teile}}{\text{Tag}}} = \frac{86.400 \frac{\text{s}}{\text{Tag}}}{10.000 \frac{\text{Teile}}{\text{Tag}}} \\ &= 8,64 \frac{\text{s}}{\text{Teil}} \end{aligned}$$

mit

$$\text{geplante Betriebszeit} = 24 \frac{\text{h}}{\text{Tag}}$$

$$\text{Abrufmenge} = 100.000 \frac{\text{Teile}}{\text{Tag}}$$

Für die Hersteller ist die Produktlebenszeit der Zeitraum, in dem das Produkt produziert wird [Sta11].

In der Automobilindustrie beginnt der Serienanlauf meist mit noch niedriger Stückzahl. Diese erreicht nach ca. zwei bis drei Jahren ihren Höhepunkt für ungefähr zwei Jahre. Anschließend läuft die Produktion über ca. zwei weitere Jahre aus. Branchenüblich ist eine grobe Stückzahlenschau von wenigen Monaten bis zu einem Jahr, auf die der Lieferant reagieren muss.

Das Modell geht davon aus, dass der Kundentakt über die gesamte Produktlebenszeit konstant bleibt. Beträgt die Produktlebenszeit sieben Jahre bei einer jährlichen Abrufmenge von 2,4 Mio. Teile, so sind im gesamten Produktlebenszeitraum 16,8 Mio. Teile herzustellen.

Weiterhin gehören an dieser Stelle die Materialeinsatzgewichte eines Produktes (Metall, Kunststoff und galvanisch aufgebrachtes Metall) zu den auftragsspezifischen Rahmenbedingungen. Diese werden vorrangig zur Berechnung der Materialkosten benötigt.

Im grünen Feld des Wertstromdesigns beschreibt das Unternehmen alle erforderlichen Fertigungsprozesse inkl. den Lagerorten und Beständen für das herzustellende Produkt. In den Datenfeldern von den jeweiligen Fertigungssystemen sind Informationen zu den Prozessen eingetragen [Dol06], die der Modellanwender selber ausarbeiten und definieren muss. Dieses Modell beschränkt sich auf die zur Kostenkalkulation notwendigsten Informationen der einzelnen Fertigungssysteme.

- Anzahl und Kosten von Maschinen (M) und Bedienpersonal (B)

Bei Kunststoff-Metall-Bauteilen kann oft eine Maschine bzw. ein ganzes Fertigungssystem von einer Person bedient werden. Zusätzlich sind hier die Kosten pro Stunde je Maschine und Bedienperson aufzuführen.

- Zykluszeit (ZZ)

Die Zykluszeit (oder auch Taktzeit genannt) beschreibt die geplante Dauer (Bearbeitungszeit) von einem produzierten Teil zum nächsten ohne Verlust-Faktoren [Erl07]. Darin sind auch Handling-Operationen oder Wartezeiten während eines Prozesses mit inbegriffen. In einem Prozess können auch mehrere Teile gleichzeitig hergestellt werden. Dann entspricht die Zykluszeit der durchschnittlichen Bearbeitungszeit für ein Teil. Hierzu das folgende Beispiel: In einem Spritzgieß-Zyklus werden mittels eines vierfach Werkzeuges vier Teile in acht Sekunden Bearbeitungszeit hergestellt. Beim Wertstromdesign entspricht dies einer Zykluszeit von zwei Sekunden pro Teil. Ein weiteres Beispiel: In einer Trommelgalvanik werden 1.000 Schüttgutteile über eine Dauer von 25 Minuten (=1.500 Sekunden) veredelt. Das Ergebnis ist eine Zykluszeit von eineinhalb Sekunden pro Teil.

- Rüstzeit (RZ)

Die Rüstzeit ist die Dauer (hier in Stunden) pro Rüstvorgang, um einen Produktwechsel auf einem Fertigungssystem durchzuführen. Während des Rüstens und Einstellens der Werkzeuge, der Handlingsgeräte oder des Materials steht das Fertigungssystem nicht zur

Verfügung. Die Rüstzeit beginnt mit dem letzten Gutteil vor dem Rüsten und endet mit dem ersten Gutteil nach dem Rüsten. Die Rüstkosten sind abhängig von der Rüstzeit pro Rüstvorgang und der Anzahl der Rüstvorgänge über den gesamten Produktlebenszeitraum.

- Anzahl der geplanten Schichten pro Tag (Schichten)

Die Anzahl der geplanten Schichten entspricht der geplanten Betriebszeit pro Tag dividiert durch die Arbeitsstunden pro Schicht.

- Verlust-Faktoren und Net Equipment Effectiveness (V, L, Q und NEE)

Zum klassischen Wertstrom werden hier weiterführend die Verlust-Faktoren nach der NEE-Systematik hinzugefügt, zu wie viel Prozent der Prozess verfügbar ist, seine Leistung erbringt und wie viele Gutteile im Serienbetrieb entstehen. Der aufgeführte NEE wird errechnet und dient weiterhin zur Berechnung der effektiven Zykluszeit (inkl. Verluste). Ohne die differenzierte Betrachtung der Verlust-Faktoren, wären die von den Ausschussteilen verursachten Kosten nicht darstellbar.

- Qualitätsverlust beim Rüsten (QR)

Aufgrund der NEE-Betrachtung wird der Anfahrausschuss benötigt. Die beim Rüsten und Anfahren des Prozesses nicht mehr verwendbaren Teile werden als Qualitätsverlust Rüsten bezeichnet. Diese Teileanzahl wird ebenfalls vom Modellanwender abgeschätzt und in das Datenfeld eingetragen.

- Losgröße (Los)

Die Losgröße ist die Teileanzahl, die am Stück zusammenhängend produziert wird. Die Rüstkosten und der Anfahrausschuss sind in der Kostenbetrachtung des Modells von der Losgröße und somit von der Anzahl der Rüstvorgänge in einem definierten Zeitraum abhängig.

- Werkzeugkosten (WKZ) und deren Lebensdauer (LD)

Die erwarteten Kosten für das erste Werkzeug (Grundwerkzeug) inkl. der Lebensdauer (Anzahl Teile) des Werkzeugs sind an dieser Stelle für jedes Fertigungssystem einzutragen.

Die Lagerorte im Wareneingang und -ausgang sowie zwischen den Fertigungsprozessen enthalten die Bestandsmengen an Rohmaterial, Produktzwischenstufen oder Fertigteilen in Form von der Teileanzahl. Diese können bei bereits umgesetzten Produkten relativ einfach durch Einsicht ins Lager ermittelt werden, was in dieser frühen Phase der Angebotsausarbeitung noch nicht möglich ist. Der Modellanwender wird hier nach einer noch folgenden Systematik vorgehen, die die Bestandsmengen abhängig von der Losgröße einheitlich definiert und nach dem durchschnittlichem Umlaufbestand und dem Sicherheitsbestand unterscheidet.

Die Fertigungsprozesse und die Bestände können auch in unterschiedliche Zeiten kategorisiert und berechnet werden. Diese sind im gelben Feld zu finden (siehe Abbildung 4-5) und erhalten ihre Zahlenbasis aus dem grünen Feld.

- Reichweite

Die an jedem Lagerplatz liegenden Teilmengen (Umlaufbestand) an Rohmaterial, Produktzwischenstufen und Fertigteilen werden mit dem Kundentakt multipliziert (vgl. [Erl10, Sch10c]). Die Ergebnisse sind die Reichweiten der Bestandsmengen als Zeiteinheit. Die Reichweite gibt den Zeitraum an, wann die Ware eines Lagerortes aufgebraucht sein wird, wenn im Kundentakt die Ware aus dem Lagerplatz entnommen werden würde. Es folgt ein Berechnungsbeispiel für die Reichweite einer Teilmenge an einem Lagerort.

$$\text{Reichweite} = \text{durchschnittlicher Umlaufbestand} \cdot \text{Kundentakt} = 100.000 \text{ Teile} \cdot 8,64 \frac{\text{s}}{\text{Teil}}$$

$$= 864.000 \text{s} = 10 \text{ Tage}$$

mit

durchschnittlicher Umlaufbestand = 100.000 Teile

$$\text{Kundentakt} = 8,64 \frac{\text{s}}{\text{Teil}}$$

Die Reichweite ist unabhängig von der Position des Lagerortes. Die Sicherheitsbestände fließen nicht in die Berechnung der Reichweite mit ein. Bei den Bestandskosten werden im Modellergebnis die Umlauf- und Sicherheitsbestände berücksichtigt.

- Durchlaufzeit (DLZ)

Klassisch wird die Durchlaufzeit als Summe aller Transport-, Liege-, Rüst- und Bearbeitungszeiten beschrieben (vgl. [MUZ06, NW03, Wie08, GGR92]). Oder als Zeitraum vom Wareneingang über die Produktion bis zum Versand eines Produktes.

Die Durchlaufzeit kann im Wertstromdesign auch über die Summe der Reichweiten errechnet werden (vgl. [Erl10, Sch10c]). Ziel ist es, Überproduktionen zu vermeiden, d.h. viele Teile in kurzer Zeit herzustellen ist Verschwendung, wenn der Kunde die Teile nicht auch zeitnah abnimmt. Die Fertigteile liegen dann im Versandlager bis der Kunde sie abrufen. Folglich ist der letzte Prozessschritt bis zum Teileabruf nicht abgeschlossen. Bei gleichbleibendem Kundentakt schneller zu produzieren, senkt nicht die Durchlaufzeit im Wertstromdesign.

Beträgt z.B. der Umlaufbestand an allen Lagerorten zusammen 200.000 Teile und der Kunde bestellt pro Tag 2.000 Teile, so ergibt sich eine Durchlaufzeit von 100 Arbeitstagen. Die Durchlaufzeit ist ein Indiz für die Kapitalbindung von Rohstoffen, Zwischen- und Endprodukten im Lager. Sie wird hauptsächlich durch die Losgröße und die Anzahl der Fertigungssysteme beeinflusst [KR08].

- Effektive Zykluszeit (EZZ)

Die effektive Zykluszeit ist der Quotient aus der Zykluszeit dividiert durch den NEE bzw. den jeweiligen drei Verlust-Faktoren und berücksichtigt so die Effektivitätsbewertungen von einzelnen Fertigungssystemen. Sie wird benötigt, um die tatsächlich erwartete Dauer der Belegung eines Fertigungssystems zu ermitteln. Die Belegungszeit für die Produktion ist nicht nur für die Berechnung der Maschinenkosten entscheidend, sondern auch für das Personal, welches ein Fertigungssystem bedient.

Beträgt beispielsweise die Zykluszeit zwei Sekunden pro Teil und der NEE liegt bei 71%, so ergibt sich eine effektive Zykluszeit von ca. 2,8 Sekunden pro Teil (siehe folgendes Beispiel).

$$\begin{aligned} \text{Effektive Zykluszeit} &= \frac{\text{Zykluszeit}}{\text{NEE}} = \frac{\text{Zykluszeit}}{V \cdot L \cdot Q} = \frac{2 \frac{\text{s}}{\text{Teil}}}{0,94 \cdot 0,80 \cdot 0,95} = \frac{2 \frac{\text{s}}{\text{Teil}}}{0,714} \\ &= 2,80 \frac{\text{s}}{\text{Teil}} \end{aligned}$$

mit

$$\text{Zykluszeit} = 2 \frac{\text{s}}{\text{Teil}}$$

Verlust - Faktor V(erfügbarkeit) = 94%

Verlust - Faktor L(eistung) = 80%

Verlust - Faktor Q(ualität) = 95%

Für die Planung wird empfohlen, mit der Zykluszeit ca. fünf bis acht Prozent schneller zu sein als der Kundentakt [Dug02]. Dabei sollte aber in jedem Fall die effektive Zykluszeit herangezogen werden.

Die Summe aller effektiven Zykluszeiten entspricht der Zeit, in der ein Teil in Form einer wertschöpfenden Aktivität bis zum Fertigprodukt bearbeitet wird.

- Losgrößenzeit (LGZ)

Die Losgrößenzeit ist die Produktionsdauer am Stück für eine definierte Anzahl an Teilen (Losgröße) multipliziert mit der effektiven Zykluszeit. Wählt man die Losgröße beispielsweise für eine monatliche Abrufmenge, lässt sich unter Beachtung der geplanten Betriebszeit die Auslastung des Fertigungssystems schnell reflektieren. Die Auswahl der Losgröße wird später noch detailliert.

Die Summe aller Losgrößenzeiten entspricht der Zeit (ohne Rüstvorgänge), die ein Teil bei gegebener Losgröße mindestens benötigt, um den Zustand des Fertigproduktes zu erlangen.

Die effektive Zykluszeit und die Losgrößenzeit sind keine typischen Kennwerte des Wertstromdesigns. Sie sind dennoch für die Kostenbetrachtung wichtig und notwendig. An ihrer Stelle stehen normalerweise ähnliche errechnete Zeiten, welchen aber eine andere Definition zu Grunde liegt. Diese fließen in das Modell nicht ein.

Das folgende Beispiel soll die Wichtigkeit für die effektive Zykluszeit und die Losgrößenzeit verdeutlichen. Abbildung 4-6 zeigt eine Gegenüberstellung von den effektiven Zykluszeiten und Losgrößenzeiten ohne und mit NEE. Die Herstellung des Fertigprodukts erfolgt durch die Bearbeitung von zwei hintereinander folgenden Fertigungssystemen mit einer Abrufmenge von 200.000 Teilen pro Monat und einem Produktlebenszyklus von 7 Jahren. Damit sind über den gesamten Produktlebenszeitraum 16,8 Mio. Teile herzustellen.

Fertigungssystem eins könnte ein Stanzautomat sein, der mit 300 Hub pro Minute produziert und somit eine Zykluszeit von 0,2 Sekunden pro Teil arbeitet. Ohne Einwirken von Verlusten kann das System eine Losgröße von 200.000 Teilen in ca. 0,46 Tagen und die im Produktlebenszeitraum erforderlichen 16,8 Mio. Teile in 38,9 Tagen produzieren. Fertigungssystem zwei, z.B. ein Spritzgießprozess mit zwei Sekunden Zykluszeit pro Teil, benötigt bei gleicher Losgröße ohne Verluste 4,63 Tage für ein Los und 388,9 Tage für die Gesamtproduktionsmenge lifetime. Betrachtet man die Losgrößenzeit für die Abrufmenge von einem Monat zur geplanten Betriebszeit (hier 20 Tage im Monat) kann das Fertigungssystem eins noch für 19,54 Tage und Fertigungssystem zwei noch für 15,37 Tage für anderweitige Produktionszwecke eingesetzt werden.

- Teilebedarf lifetime 16,8 Mio. Teile
- Losgröße 200.000 Teile
- Betriebszeit 24h pro Tag

	Fertigungs- system 1	Fertigungs- system 2	Summe
Zykluszeit	0,2s	2s	2,2s
Ohne Betrachtung der Effektivität			
Losgrößenzeit	0,46 Tage	4,63 Tage	5,09 Tage
Produktionszeit lifetime	38,9 Tage	388,9 Tage	427,8 Tage
Mit Betrachtung der Effektivität			
Verfügbarkeit	95%	94%	
Leistung	97%	80%	
Qualität	98%	95%	
NEE	90%	71%	
Effektive Zykluszeit	0,22s	2,80s	3,02s
Losgrößenzeit	0,51 Tage	6,48 Tage	6,99 Tage
Produktionszeit lifetime	43,1 Tage	544,4 Tage	587,4 Tage

Abbildung 4-6: Gegenüberstellung von EZZ und LGZ mit und ohne NEE-Betrachtung

Durch die Abschätzung eines NEE von 90% für Fertigungssystem eins und von 71% für Fertigungssystem zwei liegt die effektive Zykluszeit jetzt nur noch bei 0,22 bzw. 2,8 Sekunden pro Teil. Werden die Verluste berücksichtigt, so ergeben sich längere Produktionszeiten und somit auch höhere Kosten für das gesamte Fertigungskonzept. Ein Teil wird jetzt durchschnittlich 0,82 Sekunden länger bearbeitet.

Fertigungssystem zwei besitzt zwar weiterhin noch freie Kapazitäten, benötigt aber jetzt bereits 6,48 Tage (vorher 4,63 Tage) zur Produktion einer Losgröße.

In Summe verlängert sich die Losgrößenzeit aller Fertigungssysteme um 1,9 Tage.

Durch die Verlustbetrachtung muss das Fertigungskonzept über den gesamten Produktlebenszeitraum 159,6 Tage länger produzieren als ohne Verluste und der Hersteller ist verpflichtet, die für

diesen Zeitraum anfallenden maschinellen und personellen Kapazitäten zur Verfügung zu stellen sowie für die anfallenden Kosten aufzukommen.

Die wichtigsten Zusammenhänge und Abhängigkeiten bzgl. Durchlaufzeit, effektive Zykluszeit und der Losgrößenzeit sind in Abbildung 4-7 dargestellt. Die Zeiten geben über unterschiedliche Zwecke Aufschluss. Mit der Durchlaufzeit wird ein Bezug zwischen Lagerbeständen sowie Kundentakt hergestellt und macht das Verschwendungsthema Überproduktion für den Anwender im Wertstromdesign transparent. Es wird mit dem Modell möglich sein, das Kostenoptimum aus Rüst- und Bestandskosten zu berechnen. Die Losgrößenzeit gibt einen Einblick über die Auslastung der Fertigungssysteme und die mindestens notwendige Zeit zur Herstellung des Produktes im Unternehmen bei einer vorgegebenen Losgröße. Durch die effektive Zykluszeit besteht die Möglichkeit, Verluste mit einzubeziehen und in der Kostenkalkulation zu berücksichtigen sowie gezielt Optimierungsmaßnahmen bei der Planung von Fertigungssystemen vornehmen zu können.

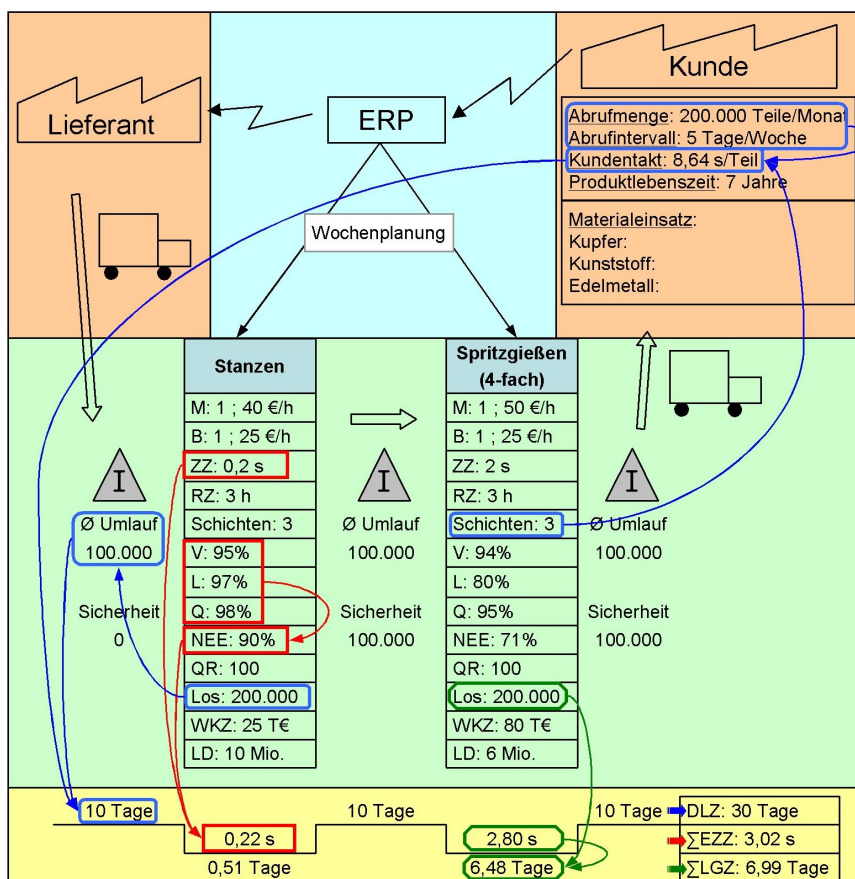


Abbildung 4-7: Zusammenhänge im Wertstromdesign

Analog zur Effektivitätsbewertung wird der Wertstrom in der Praxis bei bestehenden Prozessen als Ist-Zustand aufgenommen und anschließend optimiert (vgl. [KB08a, KB08b, LK11]). Dieses Modell soll hier ebenfalls den präventiven Ansatz nutzen und den Anwender leiten, schon im Vorfeld Fertigungssysteme und mehrstufige Fertigungskonzepte zu analysieren sowie bewerten zu müssen.

4.3 Kostenbetrachtung von Fertigungskonzepten

4.3.1 Wertstromdesign eines Fallbeispiels

Die Kostenbetrachtung von Fertigungskonzepten soll anhand des folgenden theoretischen Fallbeispiels (siehe Abbildung 4-8) erklärt und berechnet werden.

Die Werte vom Kunden sowie einzelne Werte der Fertigungssysteme (Zykluszeit, Rüstzeit, Verlustfaktoren, Qualitätsverluste Rüsten und Werkzeugkosten inkl. Lebensdauer) sind praxisorientiert ausgewählt und repräsentieren eine Möglichkeit eines Fertigungskonzeptes. Alle anderen Werte werden entweder rechnerisch ermittelt bzw. bei der Anwendung des Modells zur Kostenbetrachtung in diesem Kapitel erläutert.

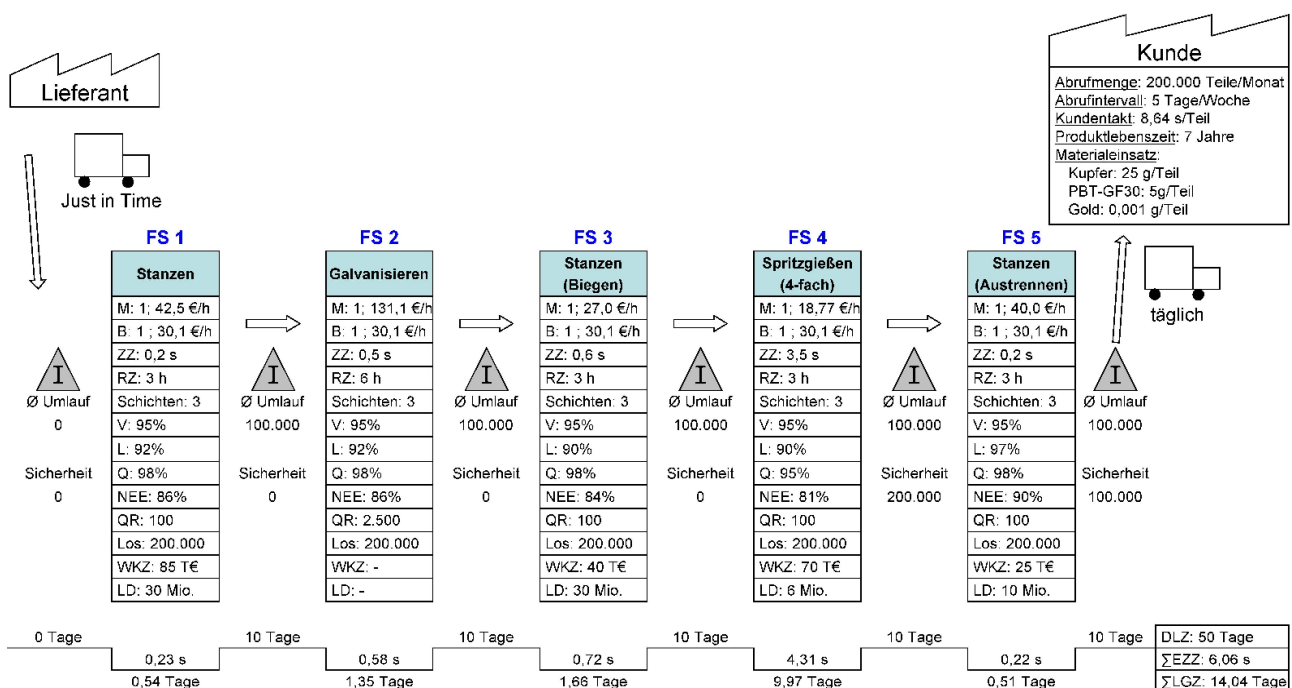


Abbildung 4-8: Wertstromdesign des Fallbeispiels

Der Kunde im Fallbeispiel wünscht 200.000 Teile pro Monat, wobei er im Monat an 20 Arbeitstagen (jeweils von Montags bis Freitags) eine Menge von 10.000 Teilen beziehen möchte. Das Produkt wird vom Hersteller im Reel-to-Reel Konzept geplant. Im ersten Fertigungssystem (FS 1) wird das Halbzeug aus Kupfer an einem Stanzautomaten flach am Band gestanzt. Die Zuführung des auf einer Palette liegenden Halbzeugs erfolgt von einem Palettenabspuler und über ein Walzenvorschubgerät in den Stanzautomaten. Nach dem Stanzvorgang wird das Stanzgitter im Durchlauf mittels einer Kamera auf Kontur überprüft und am Ende des Systems mit einer Haspel auf ein Coil wieder aufgewickelt.

Als zweites Fertigungssystem (FS 2) erfolgt eine Stanzgittergalvanik, um das flache Stanzgitter zu reinigen und anschließend mit Gold selektiv zu beschichten.

Im dritten Fertigungssystem (FS 3) findet ein erneuter Stanzprozess, das Biegen, statt. Das Bauteil lässt sich trotz der vorhandenen Biegungen weiterhin am Stanzgitter auf einem Coil aufwickeln. Der

Streifentransport erfolgt über ein Vorschubgerät und das Ab- sowie Aufwickeln des Stanzgitters über zwei Haspeln.

Das Fertigungssystem (FS 4) besteht aus einer vertikalen Spritzgießmaschine, zwei Temperiergeräten, einem Materialtrockner inkl. Fördereinrichtung, einer Streifenvorwärmstation, einem Angusspicker, einem Vorschubgerät sowie zwei Haspeln zum Ab- und Aufwickeln. Es werden bei einem Spritzgießzyklus vier Teile im Spritzgießwerkzeug am Stanzgitter aus PBT-GF30 umspritzt.

Im letzten Fertigungssystem (FS 5) wird das Stanzgitter wieder über eine Haspel abgewickelt und über ein Vorschubgerät einem Stanzautomaten zugeführt. Dort erfolgt das Austrennen sowie Abstanzen des Teils vom Stanzgitter zum Fertigteil als loses Schüttgut.

Zur Vereinfachung des Fallbeispiels wird davon ausgegangen, dass alle Zulieferer genau die notwendige Menge an Rohstoffen Just in Time anliefern können, wie sie vom Hersteller zur Produktion benötigt werden. Daher sind im Wareneingangslager keine Bestände aufgeführt.

Der Hersteller arbeitet mit täglich drei Arbeitsschichten zu je acht Arbeitsstunden an fünf Tagen pro Woche. Das Unternehmen arbeitet an 48 Arbeitswochen pro Jahr. Das ermöglicht dem Hersteller eine Betriebszeit von 240 Tagen pro Jahr bzw. von 5.760 Stunden pro Jahr.

Wird das Wertstromdesign vom Modellanwender mit den beschriebenen Vorgaben ausgefüllt, so liegen alle Informationen vor, um die Kosten für Maschinen, Personal, Material, Bestände, Rüsten und Werkzeuge berechnen zu können.

4.3.2 Maschinen

Für das Herstellen der Teile werden Maschinen in den einzelnen Fertigungssystemen benötigt. Die Kosten für das Betreiben der Fertigungssysteme werden als Maschinenkosten lifetime bezeichnet (siehe Abbildung 4-9).

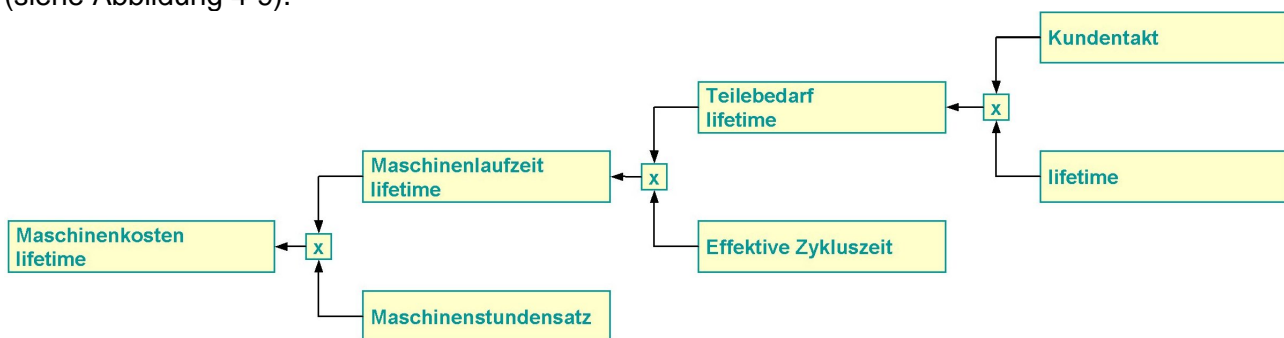


Abbildung 4-9: Maschinenkosten lifetime je Fertigungssystem

Der Maschinenstundensatz beschreibt die Kosten für das Betreiben von Maschinen inkl. Peripherie eines Fertigungssystems. Er setzt sich aus dem Verhältnis von Maschinenkosten zur Maschinenlaufzeit zusammen (vgl. [KK08, Ste10]).

Die Maschinenkosten beinhalten die jährlich anfallenden Kosten für das Betreiben einer Maschine inkl. Peripherie. Zur Ermittlung sind einige Basisdaten erforderlich.

- Anschaffungswert der Maschine
- Wiederbeschaffungswert der Maschine nach Ablauf der Abschreibungsdauer
- Abschreibungsdauer (entspricht im Modell der Produktlebenszeit)

- Energieverbrauch
- Stromkosten
- Kosten für Instandhaltung und Wartung
- Platzbedarf
- Raumkosten
- Kosten für Betriebsstoffe je Betriebsstunde
- Zinssatz
- Maschinenlaufzeit (Betriebsstunden pro Jahr)

Um den speziellen Produktfokus einfließen zu lassen, werden in diesem Modell die Jahre der Produktlebenszeit bei der Abschreibungsdauer eingetragen. Somit ist z.B. bei Neuanschaffungen sichergestellt, dass die Maschine mit Ende der Produktlebenszeit auch vollständig durch das Produkt abgezahlt worden ist. Vor allem Sondermaschinen sind oft nicht mehr für andere Produktionen verwendbar. Auch die gesamten Kosten der Peripheriegeräte, Prüfsysteme, usw. sind dem Anschaffungs- und Wiederbeschaffungswert hinzuzufügen, einschließlich deren Energieverbrauch, Platzbedarf, Instandhaltung, Wartung und Kosten für Betriebsstoffe.

Der Energieverbrauch, Kosten für Instandhaltung und Wartung sowie für Betriebsstoffe müssen, soweit dem Modellanwender keine vergleichbaren Werte vorliegen, abgeschätzt werden. Unter Betriebsstoffe sind Öle, Schmierstoffe, Wasser, etc. zu verstehen, die zur Erstellung des Produkts benötigt werden, aber nicht in das Produkt mit einfließen, wie z.B. Stanzöl oder Kühlwasser.

Hinsichtlich der Kosten für Instandhaltung und Wartung hängen die Werte von der Fertigungstechnologie und von der Maschinenlaufzeit ab. Für die Vorhersage von in Zukunft anfallenden Kosten, kann auch ein Faktor zwischen drei bis acht Prozent vom Wiederbeschaffungswert zur Schätzung herangezogen werden (vgl. [Ken08, Sch08]).

Die Maschinenlaufzeit entspricht der betrieblichen Produktionsdauer, in der die Maschine zur Serienproduktion genutzt wird. Zeiten von Rüstvorgängen und Wartungsarbeiten sind darin nicht enthalten [HD99], was mit der Effektivitätsbewertung mittels NEE übereinstimmt.

Die Maschinenlaufzeit für ein Produkt errechnet sich aus der Multiplikation der effektiven Zykluszeit mit dem jährlichen Kundenbedarf an Teilen (siehe folgendes Rechenbeispiel).

$$\begin{aligned} \text{Maschinenlaufzeit für ein Produkt} &= \text{EZZ} \cdot \text{Teilebedarf pro Jahr} = 0,25 \frac{\text{s}}{\text{Teil}} \cdot 1.000.000 \frac{\text{Teile}}{\text{Jahr}} = 250.000 \frac{\text{s}}{\text{Jahr}} \\ &= 69,44 \frac{\text{h}}{\text{Jahr}} \end{aligned}$$

mit

$$\text{EZZ} = 0,25 \frac{\text{s}}{\text{Teil}}$$

Teilebedarf pro Jahr = 1 Mio. Teile

Weiterhin soll der Modellanwender abschätzen, ob im Zeitraum der Produktlebenszeit zusätzliche Produkte zu weiteren Maschinenlaufzeiten führen. Sind einzelne Fertigungssysteme mit mehreren Produkten im Jahr verplant, so müssen vor Errechnen des Maschinenstundensatzes die unterschiedlichen Maschinenlaufzeiten addiert werden.

Dadurch werden die Maschinenstundensätze von z.B. gleichen Maschinen aber mit unterschiedlichen Produkten und Produktionsgeschwindigkeiten vergleichbarer. Die Maschine sowie das betriebene Produktspektrum der Maschinen können zusammen betrachtet und ausgewertet werden.

Mit den Basisdaten und der Maschinenlaufzeit lassen sich jetzt die

- Kalkulatorische Abschreibung
- Kalkulatorischen Zinsen
- Energiekosten
- Kosten für Instandhaltung und Wartung
- Raumkosten
- Betriebsstoffkosten

pro Jahr ermitteln [Ste10].

Exemplarisch wird eine Beispielrechnung anhand des Stanzautomaten des ersten Fertigungsschrittes (FS 1) aus dem Fallbeispiel durchgeführt. Begonnen wird mit der Maschinenlaufzeit.

$$\text{Maschinenlaufzeit für FS 1 am Produkt} = \frac{ZZ}{V \cdot L \cdot Q} \cdot \text{Teilebedarf pro Jahr}$$

$$= \frac{0,2 \frac{\text{s}}{\text{Teil}}}{0,95 \cdot 0,92 \cdot 0,98} \cdot 2.400.000 \frac{\text{Teile}}{\text{Jahr}} = 560.407 \frac{\text{s}}{\text{Jahr}}$$

$$= 155,67 \frac{\text{h}}{\text{Jahr}}$$

mit

$$ZZ = 0,2 \frac{\text{s}}{\text{Teil}}$$

Verlustfaktor V(erfügbarkeit) = 0,95

Verlustfaktor L(eistung) = 0,92

Verlustfaktor Q(ualität) = 0,98

Teilebedarf pro Jahr = 2,4 Mio. Teile

Der Monatsbedarf von 200.000 Teilen kann mit diesem Fertigungssystem in ca. 13 Stunden bzw. 0,54 Tagen hergestellt werden und entspricht der im Wertstrom aufgeführten Losgrößenzeit.

Es wird weiterhin angenommen, dass das Fertigungssystem in der Produktlebenszeit aber noch weitere Aufträge im Rahmen einer Maschinenlaufzeit von 2.700 Stunden pro Jahr produziert. In Summe führt dies zu einer gesamten Maschinenlaufzeit von ca. 2.856 Stunden jährlich.

Mit der bekannten Maschinenlaufzeit pro Jahr und den dazugehörigen Basisdaten (siehe Tabelle 4-1) können jetzt die jährlichen Maschinenkosten sowie anschließend der Maschinenstundensatz ermittelt werden. Die Basisdaten und Maschinenlaufzeiten der anderen Produkte aus Tabelle 4-1 sind fiktiv gewählte Annahmen. Trotz der theoretischen Werte sind die Daten auf praxisnahe Erfahrungen zurückzuführen.

		Fertigungssysteme im Fertigungskonzept				
		FS 1	FS 2	FS 3	FS 4	FS 5
Basisdaten Fertigungssystem	Einheit	Stanzen	Galvanik	Biegen	Spritzgießen	Austrennen
Anschaffungswert	[Euro]	450.000	2.000.000	220.000	200.000	220.000
Wiederbeschaffungswert (WBW)	[Euro]	489.126	2.173.893	239.128	217.389	239.128
Produktlebenszeit	[Jahre]	7	7	7	7	7
Energieverbrauch inkl. Peripherie	[kWh]	25	120	15	20	15
Stromkosten	[Euro/kWh]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Faktor Instandhaltung und Wartung vom WBW	[%]	3	3	3	3	3
Platzbedarf	[qm]	60	300	40	40	40
Raummierte (jährlich)	[Euro/qm]	96	96	96	96	96
Betriebsstoffe	[Euro/h]	0,5	4,0	0,5	0,5	0,5
Zinssatz	[%]	10	10	10	10	10

Jährliche Maschinenkosten

Kalkulatorische Abschreibung	[Euro/Jahr]	69.875,14	310.556,18	34.161,18	31.055,62	34.161,18
Kalkulatorische Zinsen	[Euro/Jahr]	22.500,00	100.000,00	11.000,00	10.000,00	11.000,00
Energiekosten	[Euro/Jahr]	7.139,89	52.604,78	3.370,28	6.321,36	2.217,31
Kosten für Instandhaltung und Wartung	[Euro/Jahr]	14.673,78	65.216,80	7.173,85	6.521,68	7.173,85
Raumkosten	[Euro/Jahr]	5.760,00	28.800,00	3.840,00	3.840,00	3.840,00
Betriebsstoffkosten	[Euro/Jahr]	1.427,98	17.534,93	1.123,43	1.580,34	739,10
Summe Maschinenkosten	[Euro/Jahr]	121.376,79	574.712,68	60.668,74	59.318,99	59.131,44

Jährliche Maschinenlaufzeiten

Maschinenlaufzeit durch Produkt	[h/Jahr]	155,67	389,17	477,38	2872,68	147,64
Maschinenlaufzeit durch andere Produkte	[h/Jahr]	2700,29	3994,56	1769,47	288,00	1330,56
Summe Maschinenlaufzeit	[h/Jahr]	2855,96	4383,73	2246,86	3160,68	1478,20

Maschinenstundensatz

Maschinenstundensatz	[Euro/h]	42,50	131,10	27,00	18,77	40,00
-----------------------------	-----------------	--------------	---------------	--------------	--------------	--------------

Tabelle 4-1: Basisdaten und Berechnung der Maschinenstundensätze für das Fallbeispiel

Weiterführend werden die jährlichen Maschinenkosten am ersten Fertigungssystem (Stanzen) durchgeführt, um den Maschinenstundensatz berechnen zu können.

- Wiederbeschaffungswert

Der erwartete Wiederbeschaffungswert kann auf Basis von Preisindizes berechnet werden [Hor10]. Der Zentralverband für Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) veröffentlicht jährlich eine Aufstellung der Entwicklung von Preisindizes für Werkzeugmaschinen. Das Jahr 2009 wurde mit dem Preisindex von 108,5 und das Jahr 2010 mit einem Index von 109,8 ermittelt [Sei11]. Legt man für diese beiden Jahre einen fortlaufenden Trend zugrunde, kann wie folgt der Wiederbeschaffungswert berechnet werden.

$$\text{Wiederbeschaffungswert} = \text{Anschaffungswert} \cdot \left(\frac{\text{Preisindex aktuelles Jahr}}{\text{Preisindex des Vorjahres}} \right)^{\text{Abschreibungsdauer}}$$

$$= 450.000 \text{ Euro} \cdot \left(\frac{109,8}{108,5} \right)^7$$

$$= 489.125,98 \frac{\text{Euro}}{\text{Jahr}}$$

- Kalkulatorische Abschreibung

$$\text{Kalkulatorische Abschreibung} = \frac{\text{Wiederbeschaffungswert}}{\text{Produktlebenszeit}} = \frac{489.125,98 \text{ Euro}}{7 \text{ Jahre}}$$

$$= 69.875,14 \frac{\text{Euro}}{\text{Jahr}}$$

- Kalkulatorische Zinsen

$$\text{Kalkulatorische Zinsen} = \frac{\text{Anschaffungswert}}{2} \cdot \text{Zinssatz} = \frac{450.000 \text{ Euro}}{2} \cdot \frac{10\%}{\text{Jahr}}$$

$$= 22.500 \frac{\text{Euro}}{\text{Jahr}}$$

- Energiekosten

$$\text{Energiekosten} = \text{Energieverbrauch} \cdot \text{Strompreis} \cdot \text{Maschinenlaufzeit} = 25 \text{ kWh} \cdot 0,1 \frac{\text{Euro}}{\text{kWh}} \cdot 2.855,96 \frac{\text{h}}{\text{Jahr}}$$

$$= 7.139,89 \frac{\text{Euro}}{\text{Jahr}}$$

- Kosten für Instandhaltung und Wartung

$$\text{Kosten für Wartung und Instandhaltung} = \text{Wiederbeschaffungswert} \cdot \text{Instandhaltungsfaktor}$$

$$= 489.125,98 \text{ Euro} \cdot \frac{3\%}{\text{Jahr}}$$

$$= 14.673,78 \frac{\text{Euro}}{\text{Jahr}}$$

- Raumkosten

$$\begin{aligned}\text{Raumkosten} &= \text{Platzbedarf} \cdot \text{Raummiete} = 60 \text{ m}^2 \cdot 96 \frac{\text{Euro}}{\text{m}^2 \cdot \text{Jahr}} \\ &= 5.760 \frac{\text{Euro}}{\text{Jahr}}\end{aligned}$$

- Betriebsstoffkosten

$$\begin{aligned}\text{Betriebsstoffkosten} &= \text{Kosten der Betriebsstoffe} \cdot \text{Maschinenlaufzeit} = 0,5 \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \cdot 2.855,96 \frac{\text{h}}{\text{Jahr}} \\ &= 1.427,98 \frac{\text{Euro}}{\text{Jahr}}\end{aligned}$$

In Summe ergeben sich für den ersten Fertigungsschritt jährliche Maschinenkosten von ca. 121.377 Euro.

Mit den jetzt bekannten Maschinenkosten und der Maschinenlaufzeit pro Jahr kann der Maschinenstundensatz wie folgt berechnet werden.

$$\begin{aligned}\text{Maschinenstundensatz} &= \frac{\text{Maschinenkosten}}{\text{Maschinenlaufzeit}} = \frac{121.376,79 \frac{\text{Euro}}{\text{Jahr}}}{2.855,96 \frac{\text{h}}{\text{Jahr}}} \\ &= 42,50 \frac{\text{Euro}}{\text{h}}\end{aligned}$$

Zur Ermittlung der Maschinenkosten lifetime vom ersten Prozessschritt (über den gesamten Produktlebenszeitraum) muss der Maschinenstundensatz mit der Maschinenlaufzeit für den gesamten Produktionszeitraum multipliziert werden.

Maschinenkosten lifetime = Maschinenstundensatz · Maschinenlaufzeit lifetime durch Produkt

$$\begin{aligned}&= 42,50 \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \cdot 155,67 \frac{\text{h}}{\text{Jahr}} \cdot 7 \text{ Jahre} = 42,50 \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \cdot 1089,7 \text{ h} \\ &= 46.310,91 \text{ Euro}\end{aligned}$$

Zum Betreiben des Fertigungssystems für dieses spezielle Produkt sind über den gesamten Produktlebenszeitraum beim ersten Prozessschritt 46.310,91 Euro erforderlich.

Wird diese Vorgehensweise bei den anderen Fertigungssystemen angewendet, so ergibt sich die Kostenübersicht je System in Abbildung 4-10. Durch die Addition der Maschinenkosten lifetime aller Fertigungssysteme erhält man die Gesamt-Maschinenkosten für das Fertigungskonzept.

Gesamt - Maschinenkosten = \sum Maschinenkosten lifetime aller Fertigungssysteme

$$= 46.311 \text{ Euro} + 357.146 \text{ Euro} + 90.231 \text{ Euro} + 377.397 \text{ Euro} + 41.343 \text{ Euro}$$

$$= 912.428 \text{ Euro}$$

Maschinenkosten lifetime in Euro

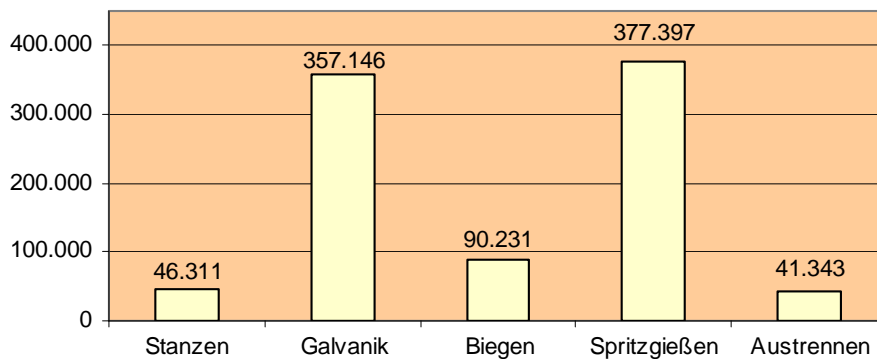


Abbildung 4-10: Maschinenkosten lifetime am Fallbeispiel

Der Spritzgieß- und der Galvanikprozess verursachen die höchsten Maschinenkosten lifetime im Fertigungskonzept. Beide Fertigungssysteme ähneln sich in der Höhe der Maschinenkosten lifetime, sind aber vom Anschaffungswert und vom Maschinenstundensatz sehr unterschiedlich. Das zeigt, dass der Maschinenstundensatz zwar notwendig für die Berechnung der Maschinenkosten ist, jedoch ohne Bezug zur Maschinenlaufzeit keine Aussage über die Maschinenkosten für ein Produkt zulässt.

Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Maschinenkosten eines Fertigungssystems sind:

- Anschaffungswert

Wenn man davon ausgeht, dass der Wiederbeschaffungswert sich vom Anschaffungswert nicht gravierend unterscheidet, so ist der Anschaffungswert ein ausschlaggebender Faktor für die Maschinenkosten im Fertigungskonzept, weil er maßgeblich die jährlichen Maschinenkosten bestimmt (vgl. auch Tabelle 4-1). Erhöht sich der Anschaffungswert, erhöhen sich auch die Maschinenkosten des Fertigungssystems. Greift man bei der Angebotsausarbeitung auf bereits realisierte Standard-Fertigungssysteme zurück, so kann mit zurückliegenden Erfahrungswerten relativ zuversichtlich der Anschaffungspreis abgeschätzt werden. Bei der Ausarbeitung von Fertigungskonzepten mit Sondermaschinen hingegen ist das Abschätzen des Anschaffungswertes bei unzureichenden Fachkenntnissen deutlich risikoreicher. Es empfiehlt sich in solch einem Fall ein Pflichtenheft auszuarbeiten und ebenfalls Angebote von Sondermaschinenherstellern einzuholen.

- Produktlebenszeit

Verlängert sich die Produktlebenszeit (bei gleichbleibenden Kundentakt), vergrößert sich der Teilebedarf lifetime und damit die Maschinenlaufzeit lifetime inkl. der Betriebskosten lifetime und die Zinskosten lifetime. Die jährlichen Abschreibungskosten werden zwar durch die längere Produktlebenszeit auf einen größeren Zeitraum verteilt, dennoch muss der Anschaffungswert über den Produktlebenszeitraum amortisiert werden. Folglich werden die Maschinenkosten lifetime ansteigen. Die Produktlebenszeit wird vom Auftraggeber vorgegeben bzw. abgeschätzt. Wird das Produkt in mehreren Automobilmarken verbaut, so kann die Produktlebenszeit sich auch verlängern, weil die unterschiedlichen Automobilmarken in der Regel auch zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf den Markt kommen.

- Maschinenlaufzeit

Die Maschinenlaufzeit für ein Produkt wird durch den Teilebedarf und die effektive Zykluszeit bestimmt. Damit ist sie zum einen abhängig von anderen Kunden mit deren Aufträgen und Bestellmengen sowie zum anderen von hohen und zuverlässigen Produktionsgeschwindigkeiten. Hohe Produktionsgeschwindigkeiten bringen freie Kapazitäten auf einem Fertigungssystem für weitere Produktionszwecke anderer Produkte. Im Fallbeispiel entspricht die Losgrößenzeit der Abrufmenge von 200.000 Teilen pro Monat. Legt man 20 Arbeitstagen pro Monat zu Grunde, so ist das Fertigungssystem vom Spritzgießen zu fast 50% mit diesem Produkt ausgelastet (siehe Abbildung 4-11). Die anderen Fertigungssysteme haben durch die kürzeren Zykluszeiten auch geringere Auslastungen durch das eine Produkt, erzielen aber durch weitere Produkte einen Hauptteil ihrer Maschinenlaufzeit.

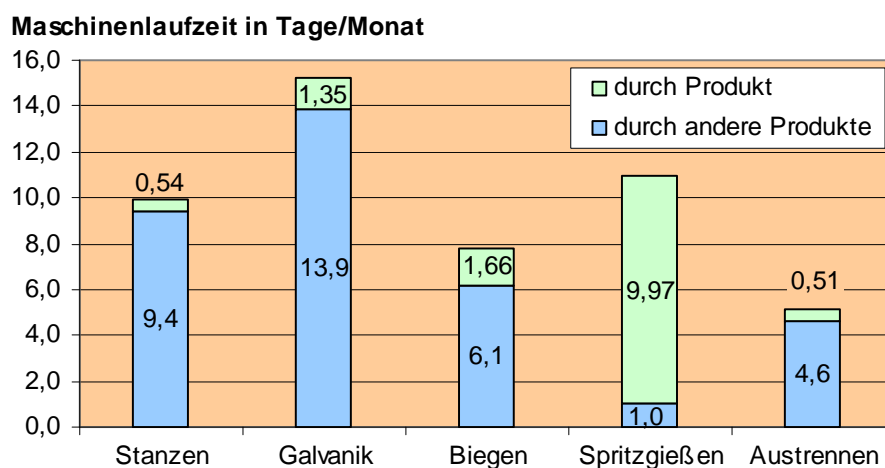


Abbildung 4-11: Maschinenlaufzeit bzw. Losgrößenzeit des Fallbeispiels

Die Maschinenlaufzeit lifetime eines Fertigungssystems kann durch die Produktionszeit von einem oder von mehreren Produkten gebildet werden und somit unterschiedlichen Einfluss auf die Maschinenkosten lifetime für ein Produkt nehmen. Produziert ein Fertigungssystem nur ein

Produkt müssen die gesamten Maschinenkosten von diesem Produkt bezahlt werden (z.B. eine spezielle Sondermaschine oder es sind auf dem Fertigungssystem aktuell keine zusätzlichen Fertigungsaufträge für weitere Produkte für das Unternehmen vorhanden).

Wird das Fertigungssystem für mehrere Produkte gemeinsam eingesetzt und dadurch die Summe der Maschinenlaufzeiten erhöht, so werden die Kosten (abhängig von den Anteilen der unterschiedlichen Maschinenlaufzeiten) auf die Produkte verteilt. Dadurch profitieren alle Produkte gemeinsam und die Maschinenkosten lifetime sind für ein Produkt geringer. Hierzu folgt zur Erläuterung ein Beispiel mit unterschiedlichen Szenarien für das Fertigungssystem Spritzgießen. Die Basiswerte aus Tabelle 4-1 bleiben bestehen, aber die Maschinenlaufzeit durch andere Produkte wird in Tabelle 4-2 in mehreren Szenarien verändert (Ausnahme ist das Szenario zwei, das entspricht dem Fallbeispiel und ist unverändert).

Durch die unterschiedlichen Maschinenlaufzeiten ändern sich die jährlichen Maschinenkosten und damit die Maschinenstundensätze.

		Fertigungssystem Spritzgießen			
Jährliche Maschinenkosten	Einheit	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Kalkulatorische Abschreibung	[Euro/Jahr]	31.055,62	31.055,62	31.055,62	31.055,62
Kalkulatorische Zinsen	[Euro/Jahr]	10.000,00	10.000,00	10.000,00	10.000,00
Energiekosten	[Euro/Jahr]	5.745,36	6.321,36	7.473,36	8.625,36
Kosten für Instandhaltung und Wartung	[Euro/Jahr]	6.521,68	6.521,68	6.521,68	6.521,68
Raumkosten	[Euro/Jahr]	3.840,00	3.840,00	3.840,00	3.840,00
Betriebsstoffkosten	[Euro/Jahr]	1.436,34	1.580,34	1.868,34	2.156,34
Summe Maschinenkosten	[Euro/Jahr]	58.598,99	59.318,99	60.758,99	62.198,99

Jährliche Maschinenlaufzeiten					
Maschinenlaufzeit durch Produkt	[h/Jahr]	2.872,68	2.872,68	2.872,68	2.872,68
Maschinenlaufzeit durch andere Produkte	[h/Jahr]	0,00	288,00	864,00	1.440,00
Summe Maschinenlaufzeit	[h/Jahr]	2.872,68	3.160,68	3.736,68	4.312,68

Maschinenstundensatz					
Maschinenstundensatz	[Euro/h]	20,40	18,77	16,26	14,42

Tabelle 4-2: Beispielszenario mit geänderten Maschinenlaufzeiten an FS4

Die Auswirkungen auf die Maschinenkosten lifetime sind in Abbildung 4-12 für das Fertigungssystem Spritzgießen ersichtlich. Die Maschinenlaufzeit des Produktes bleibt in jedem Szenario konstant. Mit zunehmenden Laufzeiten durch andere Produkte sinkt der Maschinenstundensatz. Bei gleich bleibender Produktionsdauer des Produktes führt dies zu sinkenden Maschinenkosten über die gesamte Produktlebenszeit.

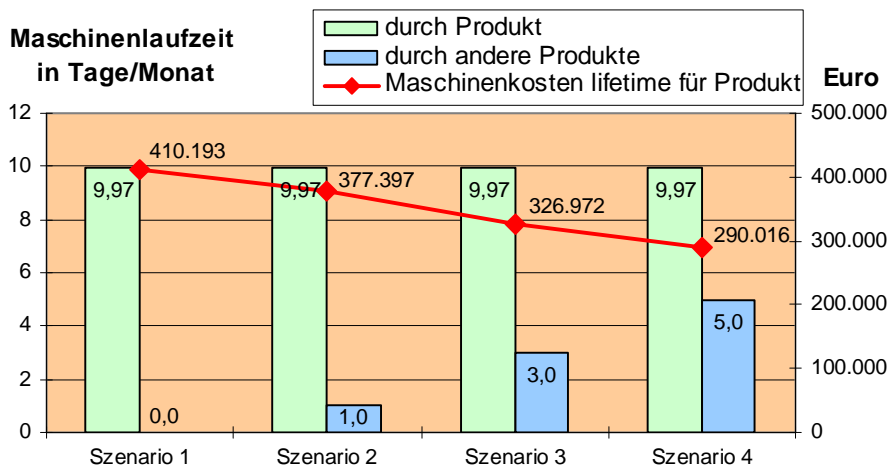


Abbildung 4-12: Einfluss der Maschinenlaufzeit auf die Maschinenkosten lifetime_{FS4} im Fallbeispiel

Die Chancen für eine hohe Maschinenlaufzeit steigen, wenn das Fertigungssystem eine entsprechend hohe Flexibilität besitzt, um ein möglichst großes Produktspektrum auch produzieren zu können. Ein System mit einer höheren Flexibilität auszustatten, erfordert aber in der Regel höhere Investitionen und dadurch einen Anstieg des Anschaffungswerts des Systems, was die Maschinenkosten für ein spezielles Produkt wieder erhöhen würde. Für den Einflussfaktor Flexibilität wird das Modell keine Lösung bieten können. Dafür sind aber Kostengegenüberstellungen von Fertigungssystemen mit unterschiedlicher technischer Ausstattung (und somit unterschiedlichen Anschaffungswerten) gekoppelt mit der Effektivitätsbewertung möglich.

4.3.3 Personal

Für die Leistungserstellung durch personenbezogene Arbeit fallen im Unternehmen Kosten an, die als Personal- oder auch Arbeitskosten bezeichnet werden. Die Personalkosten enthalten neben dem Entgelt für den Arbeitnehmer auch gesetzliche (z.B. Entgelt für arbeitsfreie Zeit wie Feiertage oder Krankheit) sowie tarifliche (z.B. Entgelt für Sonderzahlungen) und betriebliche (z.B. betriebliche Altersvorsorge) Komponenten (vgl. [OT06, PSK10, Sch06]). Im Folgenden werden ausschließlich die Personalkosten der Personen betrachtet, die die Fertigungssysteme in der Produktion bedienen. Die Personalkosten pro Stunde können hier auch als Personalstundensatz bezeichnet werden.

Die entstehenden Kosten für personelle Verwaltungsarbeit werden in das Modell nicht integriert, da diese üblicherweise als pauschale Kostenbeträge Anwendung finden und somit unternehmensspezifisch sind und kein direkter Bezug zu dem Produkt dabei entsteht (vgl. [Mäu09, Zum04]).

Die Personalkosten können im internationalen Vergleich länderspezifisch stark variieren. Folglich tragen für Unternehmen zur Entscheidung von Produktionsstandorten u.a. die Personalkosten bei. Laut einer Berechnung vom Center of Automotive Research (CAR) hat Deutschland mit 46,50 Euro pro Stunde den „teuersten Arbeitsstandort der Welt“ in der Automobilindustrie. Spanien liegt im Mittelfeld bei 25 Euro pro Stunde und Rumänien lediglich bei 4,60 Euro pro Stunde [Kri10].

Kunststoff-Metall-Bauteile finden zwar in der Automobilindustrie Anwendung, jedoch sind die Hersteller solcher Produkte in der Regel klassisch aus Stanz- oder Spritzgießbetrieben entstanden. In der Aufschlüsselung des Statistischen Bundesamtes sind die Herstellung von Kunststoff- bzw. Metallteilen dem Wirtschaftszweig „Verarbeitendes Gewerbe“ zuordbar [N.N.08]. Eine Studie des Institutes der deutschen Wirtschaft (IW) untersuchte die Personalkosten pro Stunde im Verarbeitenden Gewerbe im Jahr 2009. Spitzenreiter ist hier Norwegen mit 43,64 Euro pro Stunde, Westdeutschland liegt bei 36,05, USA und Japan bei ca. 22,90, Ostdeutschland bei 21,11 und schließlich am Schluss China mit nur 2,25 Euro pro Stunde [N.N.10b].

Das Institut für Makroökonomie und Konjunkturforschung (IMK) berechnete für das Verarbeitende Gewerbe in 2009 ähnliche Personalkosten mit einem Durchschnitt im Raum Europa von 30,10 Euro pro Stunde [NSS11].

Die Berechnung der Personalkosten lifetime ähnelt den Maschinenkosten lifetime (siehe Abbildung 4-13). Das Personal wird für die Maschinenlaufzeit benötigt und mit dem Personalstundensatz multipliziert.

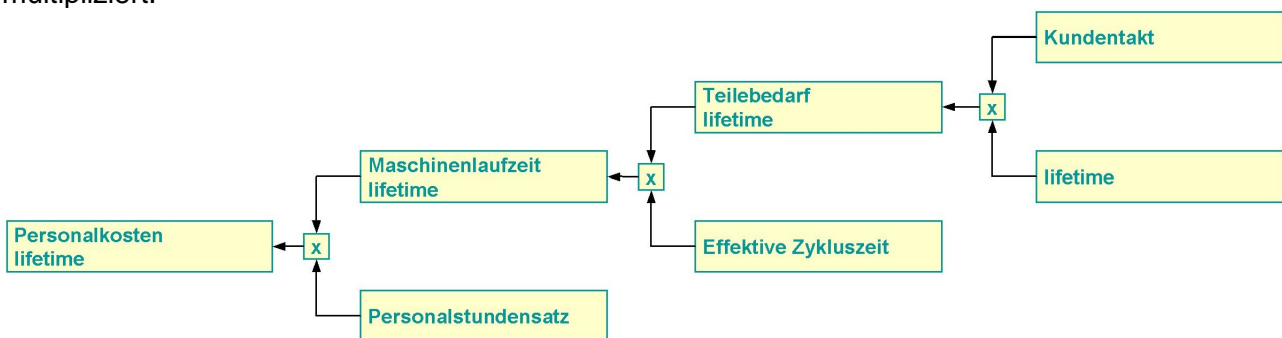


Abbildung 4-13: Personalkosten lifetime je Fertigungssystem

Für das Fallbeispiel wurde im ersten Schritt ein einheitlicher Personalstundensatz von 30,10 Euro pro Stunde als europäischer Durchschnitt von der IMK-Studie gewählt und in das Wertstromdesign eingetragen.

Einen Einfluss durch Maschinenlaufzeiten anderer Produkte gibt es bei der Betrachtung der Personalkosten nicht. Es wird davon ausgegangen, dass der Mitarbeiter flexibel auch an anderen Fertigungssystemen seine Arbeit verrichten kann. Somit findet keine Verteilung der Personalkosten auf mehrere Produkte statt, sondern es wird ausschließlich der Personalstundensatz in Verbindung mit der Maschinenlaufzeit des Produktes aus Tabelle 4-1 herangezogen.

Die Beispielberechnung der Personalkosten lifetime wird anhand den Werten des ersten Fertigungssystems aus dem Fallbeispiel durchgeführt.

Personalkosten lifetime = Personalstundensatz · Maschinenlaufzeit lifetime durch Produkt

$$\begin{aligned}
 &= 30,10 \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \cdot 155,67 \frac{\text{h}}{\text{Jahr}} \cdot 7 \text{ Jahre} \\
 &= 32.799,7 \text{ Euro}
 \end{aligned}$$

Führt man die Berechnung an allen Fertigungssystemen durch, fallen bei dem Fertigungssystem mit der längsten Maschinenlaufzeit auch die höchsten Personalkosten an (siehe Abbildung 4-14).

Personalkosten lifetime in Euro

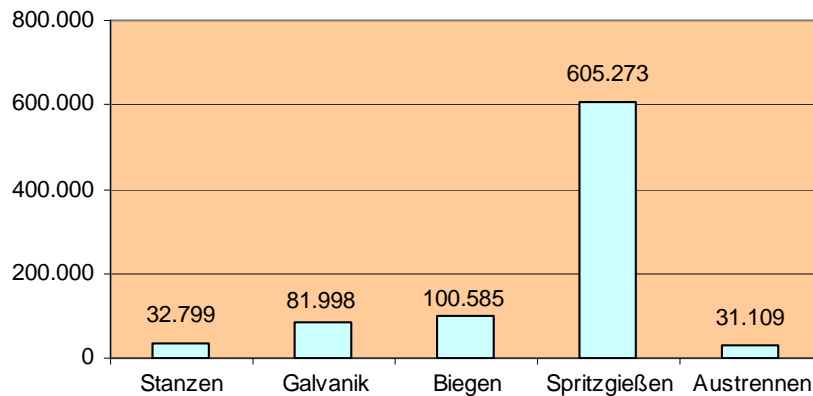


Abbildung 4-14: Personalkosten lifetime am Fallbeispiel

Durch die Addition der Personalkosten lifetime aller Systeme erhält man die Gesamt-Personalkosten für das Fertigungskonzept.

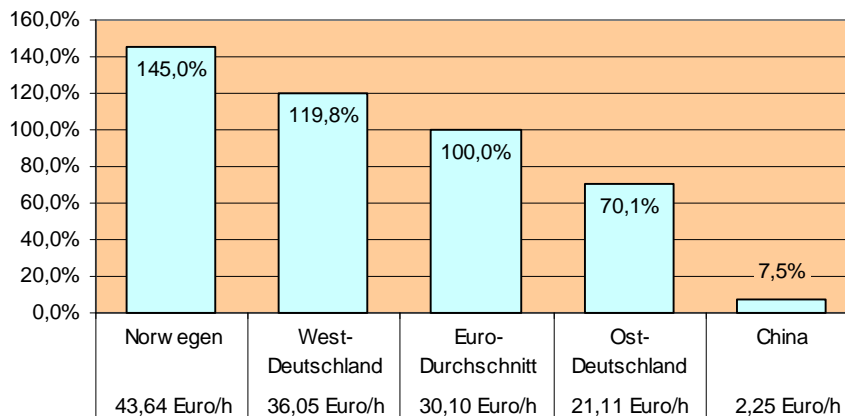
$$\begin{aligned}
 \text{Gesamt - Personalkosten} &= \sum \text{Personalkosten lifetime aller Fertigungssysteme} \\
 &= 32.799 \text{ Euro} + 81.998 \text{ Euro} + 100.585 \text{ Euro} + 605.273 \text{ Euro} + 31.109 \text{ Euro} \\
 &= 851.764 \text{ Euro}
 \end{aligned}$$

Die Personalkosten werden vorrangig durch den Personalstundensatz und die Maschinenlaufzeit beeinflusst.

- **Personalstundensatz**

Betrachtet man den Personalstundensatz vom Europa-Durchschnitt als Ausgangswert mit 100%, so differieren die Personalstundensätze in unterschiedlichen Regionen zwischen 7,5% bis 145% (siehe Abbildung 4-15).

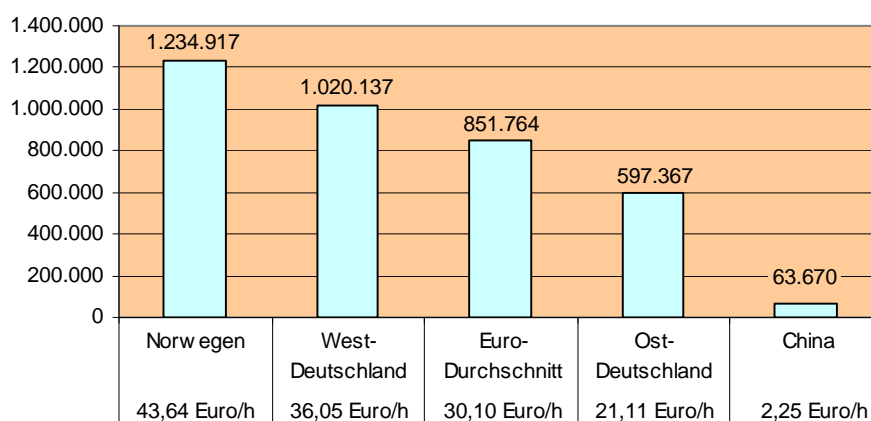
Der Personalstundensatz einer Region wird aber über die gesamte Produktlebenszeit nicht konstant bleiben. Hier sollte ein erwarteter Durchschnittswert des Personalstundensatzes im Betrachtungszeitraum prognostiziert werden, der in die Modellberechnung mit einfließen kann, damit auch zukünftige Entwicklungen von Personalstundensätzen regionalabhängig Berücksichtigung finden.

Personalstundensätze**Abbildung 4-15: Personalstundensätze (nach IMK und IW) von 2009 im Vergleich**

Bei gleich bleibender Maschinenlaufzeit ist der Zusammenhang zwischen Personalstundesatz und Personalkosten eines Fertigungssystems linear.

In Abbildung 4-16 sind die Gesamt-Personalkosten auf das Fallbeispiel angewendet worden. Eine Produktion in Norwegen benötigt über das 19-fache an Personalkosten im Vergleich zu China.

Diese Vorgehensweise ist für den Modellanwender beispielsweise nutzbar, um sein geplantes Fertigungskonzept unter internationalen Bedingungen zu vergleichen. Er kann durch Anpassen des Personalstundensatzes die Personalkosten seiner globalen Wettbewerber abschätzen (unter der Annahme von gleichen Maschinenlaufzeiten) oder aber selber unterschiedliche Produktionsstandorte im Fertigungskonzept einplanen und die Kosten gegenüberstellen.

Gesamt-Personalkosten in Euro**Abbildung 4-16: Gesamt-Personalkosten des Fallbeispiels in Abhängigkeit vom Personalstundensatz**

Weiterhin besteht mit dem Modell die Möglichkeit, Produktionsverlagerungen eines Fertigungskonzeptes an einen anderen Standort auf Wirtschaftlichkeit zu überprüfen. Die Kosten für die Verlagerung einer Produktionsanlage sollten nicht höher sein als die

Einsparung an Personalkosten. In diesem Zusammenhang müssen aber noch weitere Gesichtspunkte, wie z.B. die Versand- und Zollkosten für die Fertigprodukte oder die Produktqualität, mit betrachtet werden.

Als weiterführende Kennzahl in diesem Zusammenhang sollte auch die Arbeitsproduktivität erwähnt werden. Die Arbeitsproduktivität ist der Quotient aus Produktionsmenge zu Arbeitsstunden oder ganz allgemein aus Ergebnis zum Aufwand [Ric09]. Ob eine Person unter gleichen Voraussetzungen in gleicher Zeit mehr Arbeit verrichten kann, hängt von zwei grundlegenden Faktoren ab: Qualifikation und Motivation [Ort04]. Unter der Annahme, dass alle Mitarbeiter länderübergreifend gleich motiviert sind, so gibt es doch national wie international Qualifikationsunterschiede, ausgelöst durch das allgemeine unterschiedliche Bildungsniveau in den wiederum unterschiedlichen Regionen. Auch kulturbedingte Einflüsse oder Berufserfahrungen gehören dazu.

Die Arbeitsproduktivität wird in diesem Modell nicht explizit zur Berechnung herangezogen, weil die Arbeitsschritte in den Fertigungssystem vorrangig von Maschine, Werkzeug und Peripherie ausgeführt werden. Der Modellanwender sollte mit seinen Erfahrungswerten bei der Bewertung der Verlust-Faktoren (vgl. Kapitel 4.1) die Gegebenheiten z.B. am geplanten Produktionsstandort bewerten. Kann das gleiche Fertigungssystem an einem anderen Standort nur mit einer anderen Person die gleiche Effektivität erzielen oder ist diese höher bzw. niedriger?

- Maschinenlaufzeit

Die Maschinenlaufzeit wird durch die Teilmengen und die Zykluszeit bestimmt. Die Teilmengen werden durch Änderungen am Kundentakt oder der Produktlebenszeit beeinflusst. Für beide Informationen ist der Auftraggeber verantwortlich, so dass der Hersteller an dieser Stelle selber keinen Einfluss auf die Entwicklung der Teilmenge hat. Bei der Zykluszeit hingegen hat der Hersteller von Kunststoff-Metall-Bauteilen eigene Möglichkeiten zur Veränderung der Maschinenlaufzeit. Er kann die Zykluszeit bzw. die Effektivitätsverluste beeinflussen z.B. durch optimierte Werkzeugkonzepte oder zusätzliche Investitionen in den Prozessablauf, um unproduktive Werkzeug- bzw. Maschinenstillstände zu reduzieren.

Die Auswirkungen von Änderungen der Zykluszeit oder des Teilebedarfs, sind in Tabelle 4-3 an zwei Beispielszenarien zu erkennen. In Szenario eins sind für zwei Fertigungssysteme aus dem Fallbeispiel bei konstantem Teilebedarf die Zykluszeit (und somit auch die effektive Zykluszeit) um fünf Prozent erhöht worden, was an beiden Fertigungssystemen prozentual zum gleichen Anstieg der Personalkosten führt.

In Szenario zwei wurde bei gleichbleibenden Zykluszeiten der Teilebedarf um fünf Prozent erhöht. Die Personalkosten steigen gleichwertig zu den prozentualen Veränderungen der Zykluszeiten an.

Szenario 1 - Änderung Zykluszeit um 5%

		Szenario 1.1	Szenario 1.2	Abweichung	
				absolut	prozentual
Stanzen Fertigungssystem 1	Teilebedarf [Stück/Monat]	200.000	200.000	0,000	0%
	Zykluszeit [s]	0,200	0,210	0,010	5%
	Effektive Zykluszeit [s]	0,234	0,245	0,012	5%
	Personalkosten lifetime [Euro]	32.799	34.439	1.640	5%
Spritzgießen Fertigungssystem 4	Teilebedarf [Stück/Monat]	200.000	200.000	0,000	0%
	Zykluszeit [s]	3,500	3,675	0,175	5%
	Effektive Zykluszeit [s]	4,309	4,524	0,215	5%
	Personalkosten lifetime [Euro]	605.273	635.537	30.264	5%

Szenario 2 - Änderung Teilebedarf um 5%

		Szenario 2.1	Szenario 2.2	Abweichung	
				absolut	prozentual
Stanzen Fertigungssystem 1	Teilebedarf [Stück/Monat]	200.000	210.000	10.000	5%
	Zykluszeit [s]	0,200	0,200	0,000	0%
	Effektive Zykluszeit [s]	0,234	0,234	0,000	0%
	Personalkosten lifetime [Euro]	32.799	34.439	1.640	5%
Spritzgießen Fertigungssystem 4	Teilebedarf [Stück/Monat]	200.000	210.000	10.000	5%
	Zykluszeit [s]	3,500	3,500	0,000	0%
	Effektive Zykluszeit [s]	4,309	4,309	0,000	0%
	Personalkosten lifetime [Euro]	605.273	635.537	30.264	5%

Tabelle 4-3: Auswirkungen auf die Personalkosten durch Änderung von Zykluszeit und Teilebedarf

Gleichzeitig entsprechen diese Auswirkungen auf die Personalkosten dem Risikopotential durch Fehlannahmen bei der Planung und Ausarbeitung des Fertigungskonzeptes. Es sollten daher an den Fertigungssystemen mit den längsten Maschinenlaufzeiten besonders sorgfältige Planungen und Bewertungen der Zykluszeit stattfinden.

Weiterhin ist die Erkenntnis wichtig, dass Effektivitätsverbesserungen an Maschinen oder Peripherien nicht nur die Outputmenge in einem vorgegebenen Zeitraum erhöhen, sondern gleichzeitig die Personalkosten sinken lassen.

4.3.4 Material

Materialkosten sind die Kosten, die durch den Verbrauch an Material entstehen. Das Material kann unterteilt werden in Roh-, Hilfs-, und Betriebsstoffe [KZ02].

Rohstoffe gelten als der Hauptbestandteil des Produktes. Bei Kunststoff-Metall-Bauteilen sind dies Metalle (bzw. Metalllegierungen), Kunststoffe und galvanisch aufgebrachte Metalle (z.B. Nickel, Zinn, Gold, Silber).

Hilfsstoffe gehen ins Produkt mit ein, haben aber einen sehr geringen Wert. Es könnte sich z.B. beim Galvanikprozess um eine aufgebrachte Passivschicht handeln. Eine Passivschicht kann die Korrosionsreaktion von Metall hemmen [SHT08].

Betriebsstoffe sind nicht Bestandteil des Produktes werden aber zum Betreiben von Fertigungssystemen benötigt. Betriebsstoffe sind z.B. Kühlmittel, Schmierstoffe und Energie (vgl. [KB04, Wöl08]).

Hilfs- und Betriebsstoffe sind bereits im Maschinenstundensatz integriert (vgl. Kapitel 4.3.2), somit werden in diesem Kapitel ausschließlich die Materialkosten der Rohstoffe aufgeführt.

Die Materialkosten sind das Produkt aus Materialmenge und Materialwert [Göt10]. Übertragen auf dieses Modell setzen sich die Materialkosten lifetime aus den Materialbedarfen (Materialmengen) lifetime und den Preisen für die Materialien, also den Rohstoffpreisen, zusammen (siehe Abbildung 4-17).

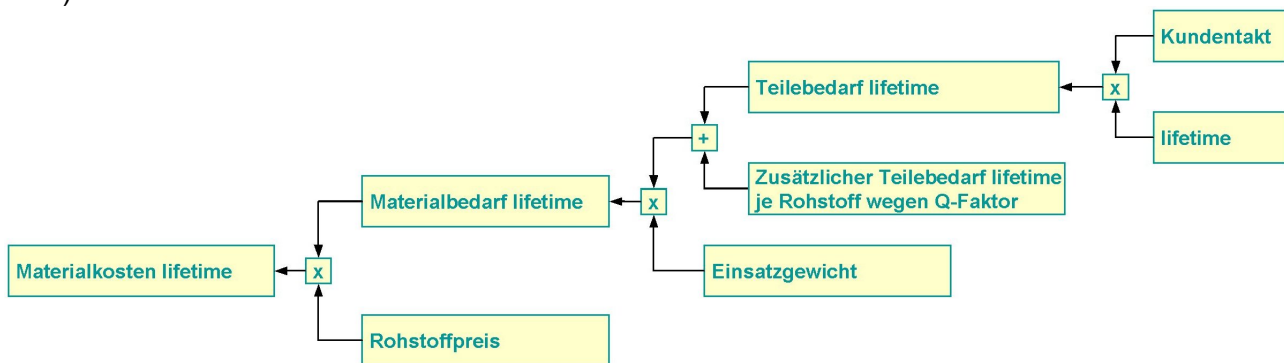


Abbildung 4-17: Materialkosten lifetime je Rohstoff

Um den gesamten Bedarf eines Rohstoffs für ein Produkt zu berechnen, muss der Teilebedarf lifetime mit dem zusätzlichen Teilebedarf vom Verlust-Faktor Qualität addiert werden. Die Summe wird anschließend mit dem Einsatzgewicht multipliziert und ergibt den Materialbedarf lifetime.

Der Teilebedarf des Kunden beträgt im Fallbeispiel 16,8 Mio. Teile in der gesamten Produktlebenszeit. Der zusätzliche Teilebedarf durch internen Ausschuss kann wie folgt für jede Fertigungsstufe pro Rohstoff berechnet werden:

$$\begin{aligned}
 \text{Zusätzlicher Teilebedarf lifetime wegen Q - Faktor} &= \frac{\text{Teilebedarf lifetime}}{Q} - \text{Teilebedarf lifetime} \\
 &= \frac{16.800.000 \text{ Teile}}{0,98} - 16.800.000 \text{ Teile} \\
 &= 342.857 \text{ Teile}
 \end{aligned}$$

mit

Teilebedarf lifetime = 16,8 Mio. Teile

Verlustfaktor Q(ualität) = 0,98

Die Berechnung für jedes einzelne Fertigungssystem und jeden Rohstoff ist notwendig, weil nicht in jeder Fertigungsstufe alle Rohstoffe verarbeitet werden. Das gewalzte Kupfer findet von der ersten bis zur letzten Prozessstufe Anwendung. Das galvanisch aufgebrachte Gold wird ab dem zweiten und das Kunststoffgranulat erst ab dem vierten Fertigungsschritt im Produktionsprozess verarbeitet. Dadurch ergeben sich in Summe für jeden Rohstoff unterschiedliche, zusätzliche

Teilebedarfe durch den Verlustfaktor Qualität. In Tabelle 4-4 sind die durch den Q-Faktor zusätzlichen Teilebedarfe für das Fallbeispiel aufgeführt.

Fertigungssysteme im Fertigungskonzept					
	FS 1	FS 2	FS 3	FS 4	FS 5
	Stanzen	Galvanik	Biegen	Spritzgießen	Austrennen
Q-Faktor	98%	98%	98%	95%	98%
Metall	342.857	342.857	342.857	884.211	342.857
Kunststoff	0	0	0	884.211	342.857
Edelmetall	0	342.857	342.857	884.211	342.857
Summe					
					2.255.639
					1.227.068
					1.912.782

Tabelle 4-4: Zusätzlicher Teilebedarf durch Q-Faktor für einen Kundenbedarf von 16,8 Mio. Teilen

Das Einsatzgewicht pro Teil entspricht dem Gewicht des eingesetzten Rohstoffs pro Teil. Wird z.B. eine Unterlegscheibe aus einer quadratischen Platine gestanzt, so enthält die Unterlegscheibe nur das Teilegewicht und die gesamte quadratische Platine vor dem Stanzen das Einsatzgewicht. Beim Spritzgießen spricht man auch vom Schussgewicht, welches aus Formteilegewicht und Angussgewicht besteht [Jar08]. Hier wird bei Spritzgießwerkzeugen mit mehreren Kavitäten das durchschnittliche Schussgewicht pro Nest als Einsatzgewicht angesehen. Theoretisch wäre in diesem Modell auch die Verwendung des Teilegewichts möglich, aber da ein Unternehmen Materialien als kapitalbindende Rohstoffmenge einkauft und auch lagern muss, kommen die Einsatzgewichte zum Tragen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass der Auftraggeber seine bestellten Teile inklusive dem angefallenen Materialabfall zur Wiederverwertung beigestellt bekommt. Ausnahme ist in diesem Modell die Galvanik. Hier wird unter Einsatzgewicht das Gewicht der galvanisch aufgetragenen Schicht zur Berechnung verwendet (also das Materialgewicht, welches sich nach dem Prozess auf dem Teil befindet). Im Galvanikprozess übersteigt das Einsatzgewicht eines Galvanikbades bei weitem das Gewicht der aufgetragenen Galvanikschicht.

Mit den bekannten Einsatzgewichten pro Teil (vgl. Abbildung 4-8 im „Kundenfeld“) sind die Materialbedarfe je Rohstoff ermittelbar. Anhand des Kupfermaterials aus dem Fallbeispiel wird der Materialbedarf ausgerechnet. Die Ergebnisse der Materialbedarfe der anderen Rohstoffe sind in Tabelle 4-5 zu finden.

$$\text{Materialbedarf}_{\text{lifetime}_{\text{Cu}}} = \text{Einsatzgewicht}_{\text{Cu}} \cdot (\text{Teilebedarf}_{\text{lifetime}} + \sum \text{zusätzlicher Teilebedarf Q - Faktor}_{\text{Cu}})$$

$$= 25 \frac{\text{g}}{\text{Teil}} \cdot (16.800.000 \text{ Teile} + 2.255.639 \text{ Teile})$$

$$= 476.391,0 \text{ kg}$$

mit

$$\text{Einsatzgewicht}_{\text{Cu}} = 25 \frac{\text{g}}{\text{Teil}}$$

$$\text{Teilebedarf}_{\text{lifetime}} = 16.800.000 \text{ Teile}$$

$$\text{Zusätzlicher Teilebedarf Q - Faktor}_{\text{Cu}} = 2.255.639 \text{ Teile}$$

Die Rohstoffpreise sind die Kosten, zu denen ein bestimmtes Gewicht (bzw. Menge) eingekauft wird. Es wird im Modell davon ausgegangen, dass die Rohstoffpreise den gesamten Produktlebenszyklus über konstant bleiben. Daher sollten die Preise der Rohstoffe als prognostizierte Mittelwerte über die zukünftige Produktlebenszeit in der Berechnung herangezogen werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Kostenkalkulation des Modells mit unterschiedlichen abgeschätzten Preisen durchzuführen und gegenüberzustellen. Vor allem „worst“ und „best“ case Szenarien können wertvolle Erkenntnisse über die möglichen Materialkosten liefern sowie Auswirkungen hinsichtlich Chancen und Risiken auch im Bezug auf die Gesamtkosten für Fertigungskonzepte aufzeigen.

Die drei Rohstoffe aus dem Fallbeispiel sind in Tabelle 4-5 dargestellt. Die Auswahl der Preise erfolgte anhand von aktuellen Börsenkursen für Rohstoffe. Üblicherweise kommen noch so genannte Umarbeitungskosten hinzu, damit der Rohstoff auch in der benötigten Form mit den erforderlichen Werkstoffeigenschaften angeliefert wird. Diese wurden hier für das Fallbeispiel vernachlässigt.

Die Materialkosten lifetime werden durch Multiplikation der Materialbedarfe je Rohstoff und den zugehörigen Rohstoffpreisen ermittelt. Exemplarisch wird das Beispiel vom Kupfer fortgeführt. Die Materialkosten der anderen beiden Rohstoffe sind in Tabelle 4-5 enthalten.

$$\begin{aligned} \text{Materialkosten lifetime}_{\text{Cu}} &= \text{Materialbedarf lifetime}_{\text{Cu}} \cdot \text{Rohstoffpreis}_{\text{Cu}} = 476.391,0 \text{ kg} \cdot 7 \frac{\text{Euro}}{\text{kg}} \\ &= 3.334.737 \text{ Euro} \end{aligned}$$

Material		Einsatzgewicht [g/Teil]	Materialbedarf lifetime [kg]	Rohstoffpreis [Euro/kg]	Materialkosten lifetime [Euro]
Metall	Cu	25	476.391,0	7	3.334.737
Kunststoff	PBT-GF 30	5	90.135,3	2	180.271
Edelmetall	Au	0,001	18,7	40.000	748.511

Tabelle 4-5: Einsatzgewicht, Materialbedarf, Rohstoffpreis und Materialkosten je Rohstoff

Die Gesamt-Materialkosten entsprechen der Summe der Materialkosten lifetime aller Rohstoffe. Im Fallbeispiel betragen die Gesamt-Materialkosten ca. 4,26 Mio. Euro.

$$\begin{aligned} \text{Gesamt - Materialkosten} &= \sum \text{Materialkosten lifetime aller Rohstoffe} \\ &= 3.334.737 \text{ Euro} + 180.271 \text{ Euro} + 748.511 \text{ Euro} \\ &= 4.263.519 \text{ Euro} \end{aligned}$$

Dominiert wird dieser Kostenblock durch das Kupfer (siehe Abbildung 4-18). Trotz der geringen Menge an Edelmetall übersteigen in der Betrachtung der Produktlebenszeit die Kosten des

verbrauchten Goldes die Kosten des Kunststoffes. Weiterhin sind die Einflüsse des Q-Faktors erkennbar. Sie betragen zusammen über 0,48 Mio. Euro.

Materialkosten lifetime in Euro

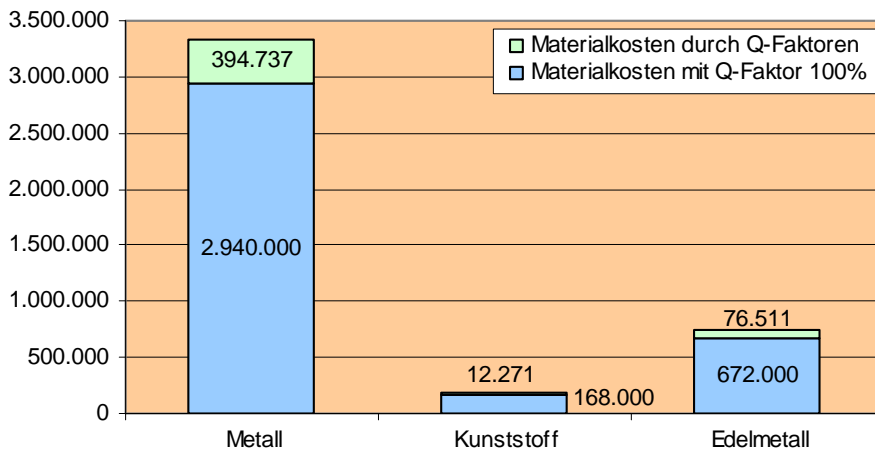


Abbildung 4-18: Materialkosten lifetime je Rohstoff am Fallbeispiel

Um diese zusätzlichen Materialkosten durch die Verluste des Q-Faktors bereits in der Angebotsausarbeitung zu analysieren und beeinflussen zu können, ist eine Betrachtung auf der Ebene der Fertigungssysteme hilfreich. Mit den aufgeführten zusätzlichen Teilmengen aus Tabelle 4-4, können die zusätzlichen Materialkosten je Fertigungssystem berechnet und dargestellt werden (siehe Abbildung 4-19). Der Spritzgießprozess aus dem Fallbeispiel besitzt an dieser Stelle die größten zusätzlichen Materialkosten durch Qualitätsverluste.

Betrachtet man die zusätzlichen Materialkosten, entspricht eine Halbierung der Qualitätsverluste auch einer Halbierung der zusätzlichen Materialkosten.

Diese Verluste wirken sich aber nicht nur auf die Materialkosten, sondern auch auf die effektive Zykluszeit und somit auf die Maschinenlaufzeit aus. Folglich gibt es auch einen Zusammenhang mit den Maschinen- und Personalkosten, weil diese ebenfalls mit der Maschinenlaufzeit in Verbindung stehen.

Es gibt Verbesserungsmaßnahmen, die keine Investitionskosten verursachen, wie z.B. das Verringern von Qualitätsverlusten durch Vergrößern von Toleranzgrenzen an kritischen Merkmalen eines Zwischen- oder Endprodukts. So werden direkte Ersparnisse an den Materialkosten sichtbar. Weitere Verbesserungsmöglichkeiten bei den Qualitätsverlusten könnten aber auch durch optimierte Werkzeugkonzepte, verbesserte bzw. zusätzliche Maschinen oder Peripherien erzielt werden. In der Regel sind diese Maßnahmen mit Investitionen verbunden, die sich durch die erwarteten Ersparnisse amortisieren sollten. Mit dem Modell können technische Optimierungen an Fertigungskonzepten im Zusammenhang von Maschinen- Personal-, Material- und Werkzeugkosten im Verhältnis von Nutzen zu Aufwand betrachtet werden. Hierzu folgt später noch ein Beispiel.

Zusätzliche Materialkosten lifetime durch Q-Faktor in Euro

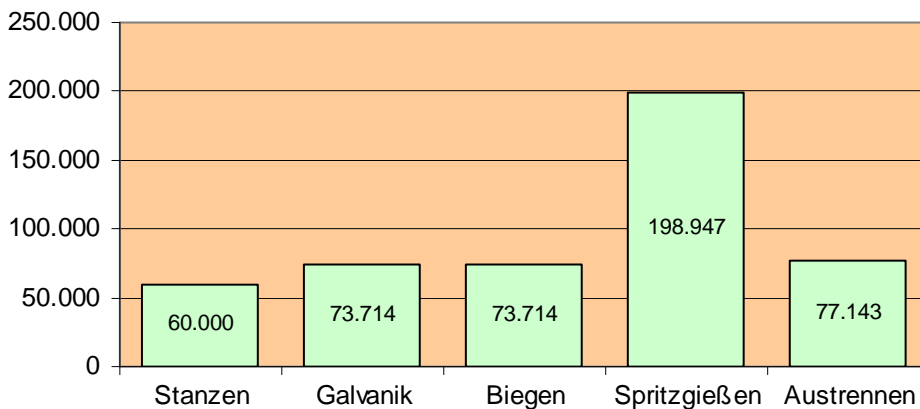


Abbildung 4-19: Zusätzliche Materialkosten aller Rohstoffe durch Q-Faktor je Fertigungssystem

Die Materialkosten lifetime werden weiterhin durch folgende Faktoren beeinflusst

- Teilebedarf

Der Kunde schätzt seinen Teilebedarf lifetime ab und kann selbst in der Phase der Serienproduktion nur bedingt Auskunft über die zukünftigen Abrufzahlen geben. Bestellt ein Kunde mehr Teile, so fallen zwangsweise höhere Materialkosten lifetime im Fertigungskonzept an. Um die Abhängigkeit von Schwankungen im Teilebedarf zu reduzieren, sollten Produkte mit einem Preis pro Stück angeboten werden. Der Teilebedarf ist im Zusammenhang mit dem Rohstoffpreis zu betrachten.

- Rohstoffpreis

Für gewöhnlich sind die Rohstoffpreise unter anderem abhängig von der Bezugsmenge. Der Modellanwender kann für unterschiedliche Szenarien an Teilebedarfen mit angepassten Rohstoffpreisen die Fertigungskonzepte untersuchen und eine mengenabhängige Kostenbetrachtung durchführen.

- Einsatzgewicht

Die prozentuale Änderung vom Einsatzgewicht entspricht auch der prozentualen Änderung der Materialkosten. Das Einsatzgewicht ist abhängig vom Design des Endprodukts aber auch von dem Design der Zwischenprodukte, welche der Hersteller in der Angebotsphase selber in seinem Fertigungskonzept beeinflussen kann.

Abbildung 4-20 skizziert zwei Fertigungskonzepte für ein gleiches Endprodukt mit unterschiedlichen Einsatzgewichten eines Halbzeugs mit gleicher Materialdicke. Durch den kurzen Abstand der Leiterbahnen im Stanzstreifen im Konzept eins ist das Einsatzgewicht

geringer als im Konzept zwei. Die Anordnung der Leiterbahnen im Stanzstreifen hat wesentliche Auswirkungen auf das Einsatzgewicht vom Halbzeug und den galvanisch aufgetragenen Edelmetallen, aber auch auf die Prozessgestaltung von Fertigungsabläufen. Bei Konzept eins ist vor dem Spritzgießen eine Investition in Maschinen oder zusätzliches Personal erforderlich, um die losen Leiterbahnen zu sortieren und in die Kavität einzulegen.

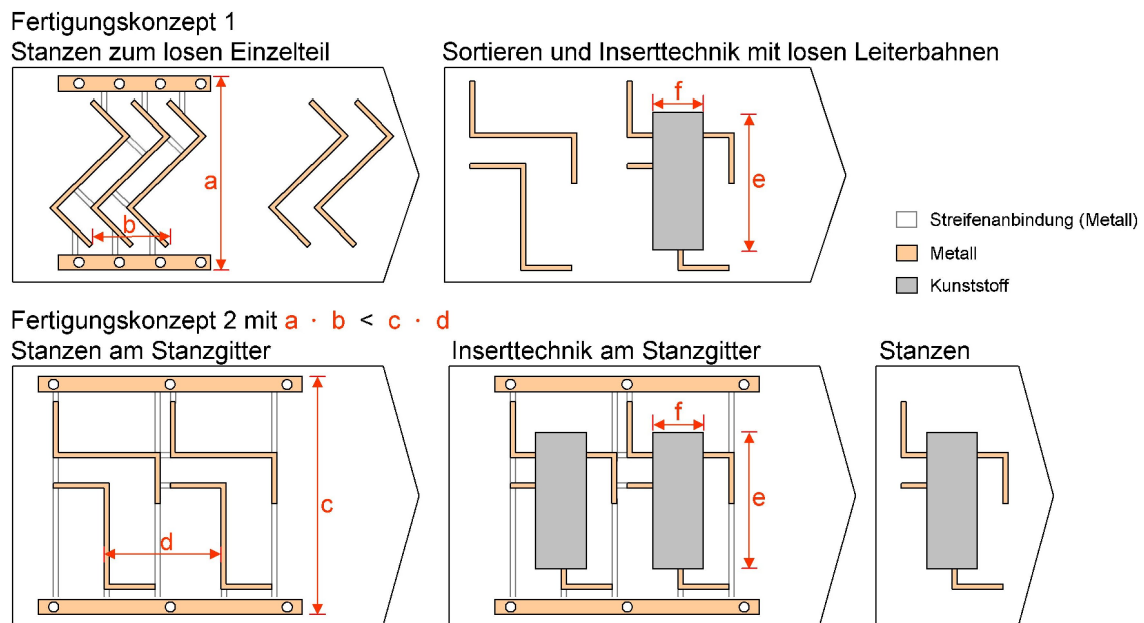


Abbildung 4-20: Skizzierte Stanzstreifenauslegung für zwei unterschiedliche Fertigungskonzepte

Das Einsatzgewicht vom Kunststoff kann z.B. durch Auswahl des Angussystems im Werkzeug beeinflusst werden, beispielsweise durch den Einsatz eines Heißkanalsystems anstatt eines Kaltkanalsystems.

Beim Heißkanalsystem wird der Angussverteiler mittels Heizungen beheizt. Während des Betriebs erkaltet die Kunststoffschmelze nicht im Heißkanalsystem und wird erst am Anspritzpunkt thermisch getrennt. So kommt es nicht zum Verlust des Angussmaterials. Beim Kaltkanalsystem hingegen erkaltet das Angussmaterial (wie das Teil auch) und wird nach jedem Zyklus entformt.

Dafür sind Heißkanalsysteme technisch aufwendiger sowie teurer in der Anschaffung und Wartung [MMM07].

Eine pauschale Entscheidung über das kostengünstigste Fertigungskonzept nur über das Einsatzgewicht des Materials ist aber nicht ausreichend, weil je nach Prozessabfolge unterschiedliche Maschinen und Peripherien oder Werkzeuge eingesetzt werden müssen. Das Modell bietet durch die gesamtheitliche Betrachtung aller Kostenkategorien dem Anwender die Möglichkeit einer Gegenüberstellung und Auswertung von unterschiedlichen Fertigungskonzepten.

4.3.5 Losgröße

Eine Teilmenge, die unmittelbar nacheinander ohne Rüstvorgänge auf einem bestimmten Fertigungssystem produziert wird, nennt man Los oder auch Losgröße [DS07]. Die Losgröße beeinflusst die Rüstkosten und die Bestandskosten gegenläufig. Diese beiden Begriffe werden in den folgenden Kapiteln noch erläutert.

Eine kleine Losgröße in einem definierten Zeitraum erhöht einerseits die Anzahl an Rüstvorgängen und dadurch auch die Rüstkosten. Andererseits werden durch kleine Losgrößen die Bestandsmengen geringer. Die optimale Losgröße ist das Ziel der Losgrößenplanung und entspricht hier einem Minimum der Summe aus Rüst- und Bestandskosten (vgl. [DS05, KMO09]).

Eine sehr bekannte Losgrößenformel liefert das Verfahren von Andler bzw. Harris. Diese Formel ist relativ einfach gestaltet und veranschaulicht die Situation der Berechnung der Losgröße. Sie beinhaltet jedoch kritisch diskutierte Rahmenbedingungen, wie z.B. die Annahme einer einstufigen Fertigung, die Betrachtung von nur einem Produkt, einer unendlich kurzen Zykluszeit und einer unbegrenzten Kapazität des Fertigungssystems [Sch09]. Dennoch findet dieses Verfahren in der Praxis häufige Beachtung.

Die Planung der Losgröße kann von vielen Faktoren abhängig sein und ist unternehmensspezifisch zu betrachten. In der Literatur gibt es eine Vielzahl von entwickelten Modellen zur Losgrößenproblematik. Einige sind mathematisch so komplex, dass Sie in der Praxis kaum Anwendung finden. Bis heute dominiert noch kein Berechnungsverfahren (vgl. [Sah10, Voi08]). An dieser Stelle wird davon abgesehen, einzelne existierende Berechnungsverfahren weiter detailliert vorzustellen.

Dennoch wird hier ein Ansatz benötigt, um mit geringem Planungsbedarf einen nutzbaren Umgang mit dem Thema zu ermöglichen. Im Anfragestadium liegen zudem noch verallgemeinerte Rahmenbedingungen vor. Der Modellanwender muss sich versichern, dass die erforderlichen Kapazitäten der Fertigungssysteme auch zur Verfügung stehen. Rüstzeit ist produktionslose Zeit und verringert die theoretische, maximale Kapazität zur Produktion des Fertigungssystems. Ist ein Fertigungssystem kurz unterhalb seiner Volllast, entstehen durch häufige Rüstvorgänge eventuell zusätzliche, ungewollte Engpässe.

Aber nicht nur der zeitliche Aspekt der Kapazitäten ist entscheidend, sondern auch der wirtschaftliche Aspekt von unterschiedlichen Produkten auf einem Fertigungssystem. Es könnte z.B. sein, dass auf einem Fertigungssystem mehrere Produkte geplant sind und nicht alle mit ihrer eigenen, optimalen Losgröße nacheinander produziert werden können.

Die Auswahl für die optimale Losgröße sollte aus der wirtschaftlichen Gesamtbetrachtung für alle Produkte eines Fertigungssystems erfolgen.

Produkte können aus unterschiedlichen Sichtweisen favorisiert betrachtet werden, z.B. über die längste Losgrößenzeit oder über die Höhe vom Umsatz bzw. Gewinn.

Weiterhin spielen die Wartungszyklen von Werkzeugen, Maschinen und Peripherie eine wichtige Rolle. Sie sollten mit der ausgewählten Losgröße harmonisieren und nicht zu zusätzlichen Produktionsunterbrechungen und Rüstvorgängen führen.

Anfangs wird dem Anwender für dieses Modell empfohlen, mit einer Losgröße im Teilebedarf je Monat zu beginnen. Das bedeutet, dass pro Losgröße ein gesamter Monatsbedarf produziert wird und dadurch jedes Fertigungssystem einmal im Monat für dieses Produkt gerüstet wird. Um die

Losgröße im Modell optimieren zu können, sind die Erklärungen von den nun folgenden Bestands- und Rüstkosten notwendig.

Für das Fallbeispiel finden mit der Losgröße von 200.000 Teilen insgesamt 84 Rüstvorgänge im gesamten Produktlebenszyklus für 16,8 Mio. Teile statt.

4.3.6 Bestände

Der Bestand beschreibt die Menge an Teilen im Prozessdurchlauf [KGJ09]. Damit ist der Bestand die Differenz zwischen den eingegangenen Teilmengen an Rohstoffen im Wareneingang und den abgegangenen Fertigteilen im Warenausgang zu einem bestimmten Zeitpunkt. Bestände binden Kapital des Unternehmens und sollten daher so niedrig wie möglich gehalten werden [Löd08]. Der Kunde wird die Ware erst bei körperlicher Anlieferung bezahlen.

Die Teilmengen an Bestand liegen mit dem Start der Serienproduktion vollständig vor. Es folgen zwei Kategorien für die Einteilung von Beständen, der Umlauf- und der Sicherheitsbestand.

Im Umlaufbestand sind alle Teilmengen an Rohstoffen, Zwischenprodukten und Endprodukten vom Wareneingang bis zum Fertigwarenlager enthalten [Kle07]. Erst wenn das Fertigteil körperlich den Warenausgang verlassen hat, gehört es nicht mehr zum Umlaufbestand. Der Lagerort, ob z.B. in der Produktion oder im Hochregallager, ist dabei unerheblich.

Für dieses Modell geht Abbildung 4-21 vereinfacht von einem kontinuierlichen Teileabfluss durch konstanten Kundentakt sowie von einer unendlich kurzen Zykluszeit eines Fertigungssystems aus. Bei Produktionsstart nach dem Rüsten ist das ganze Los bereits produziert. Der durchschnittliche Umlaufbestand entspricht der halben Losgröße eines Fertigungssystems (vgl. [BS04b, Tie05]). In der Realität kann es vorkommen, dass während der laufenden Produktion, vor Beendigung der gesamten Losgröße, die bereits fertigen Teile in den nächsten Prozessschritt einfließen bzw. an den Kunden versendet werden [KMO09]. Diese Randbedingung wird hier nicht weiter verfolgt.

Der Sicherheitsbestand ist eine zusätzliche Bestandsmenge zum Umlaufbestand, um unvorhergesehene Ereignisse zu einem gewissen Grad kompensieren zu können, wie z.B. Schwankungen im Kundentakt, Qualitätsprobleme, Lieferverzögerungen, etc. Das produzierende Unternehmen kann unter Abwägung einer Kosten-Risiko-Betrachtung die Höhe des Sicherheitsbestands auswählen [Kur05].

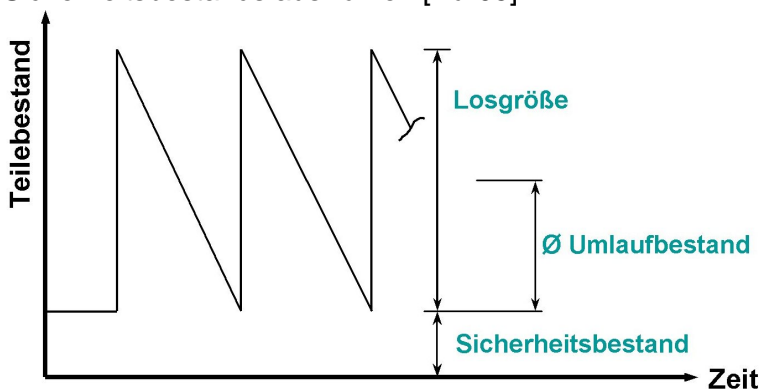


Abbildung 4-21: Bestandsverlauf

In der Praxis kommt es vor, dass Auftraggeber einen Sicherheitsbestand auch vertraglich vorschreiben.

In der Literatur findet man mehrere Modelle bzw. Verfahren zur Berechnung eines Sicherheitsbestandes, wie z.B. mit Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors, heuristische Verfahren und mathematische Modelle. Viele erhalten in der Praxis aufgrund ihrer Komplexität nur wenig Anwendung [Bie08]. Die exakte Lösung wird als komplex bzw. als schwierig umsetzbar beschrieben (vgl. [Dic09, Gud02, Gud10]).

Je nach Unternehmensgröße, der Anzahl an Aufträgen und Kapazitäten von Fertigungssystemen ist die übergreifende Koordination des gesamten Produktionsprogramms eine anspruchsvolle Aufgabe. Vor allem mehrfach belegte Fertigungssysteme und eine hohe Fertigungstiefe ergeben viele Abhängigkeiten bei der Produktionsplanung. Um möglichst allen Auftragszielen gerecht zu werden, wird an dieser Stelle für das Modell eine Systematik mit den drei folgenden Regeln hinterlegt:

- A) Das Fertigungssystem mit der längsten effektiven Zykluszeit besitzt auch die längste Losgrößenzeit. Für den Teilezustand nach diesem Fertigungssystem wird eine komplette Losgröße als Sicherheitsbestand angelegt. Damit ist auch das Thema der Wiederbeschaffungszeit von Rohstoffen bzw. Zwischenprodukten integriert, weil der Sicherheitsbestand ein Zeitintervall zwischen zwei planmäßigen Produktionen abdeckt. Das Koordinieren von unplanmäßigen Sonderproduktionen sollte verhindert werden.
- B) Vom Fertigteil wird eine halbe Losgröße als Sicherheitsbestand hinterlegt. So kann bei Problemen sehr kurzfristig die Lieferfähigkeit aufrechterhalten werden.
- C) Alle anderen Fertigungssysteme bzw. Teilezustände erhalten keinen Sicherheitsbestand.

Ist aus dem Sicherheitsbestand einmal eine Teilmenge entnommen worden, so muss der Bestand anschließend selbstverständlich wieder aufgefüllt werden. Dieser Fall wird im Modell aber nicht mitbetrachtet.

Dennoch wird der beschriebene Sicherheitsbestand keine Garantie liefern können, um jegliche ungewollte Ereignisse auszugleichen. Bei Qualitätsproblemen kann es durchaus vorkommen, dass der gesamte Umlauf- und Sicherheitsbestand betroffen sind.

In die Berechnung der Reichweiten und der Durchlaufzeit fließt ausschließlich der Umlaufbestand ein.

Die Zusammensetzung der Bestandsmengen ist nun bekannt. Für das weitere Verständnis zur Kostenberechnung werden vorab noch zwei Faktoren beschrieben.

Lagerkosten entstehen u.a. durch innerbetrieblichen Transport, Flächen- bzw. Raumnutzung, Personal in der Logistik, Nutzung von Lagereinrichtungen und -hilfsmitteln, etc. [Heß10]. Die Lagerkosten sind abhängig von der Bestandsmenge und können über einen Lagerfaktor unternehmensspezifisch berechnet werden [Der95].

Der Lagerfaktor wird in der metallverarbeitenden Industrie pro Jahr im Durchschnitt auf zusätzlich 25% vom Wert des Produktzustandes (100%) eingeschätzt (vgl. [Erl10, Mar09]).

„Für das in Beständen gebundene Kapital sind Zinskosten zu tragen“ [Löd08]. Es wird davon ausgegangen, dass ein Zinssatz von z.B. 10% über den gesamten Produktlebenszyklus konstant

bleibt und jedes Jahr anfällt. Weiterhin wird angenommen, dass Bestände zum Auslauf des Produktes im letzten Jahr aufgebraucht werden [Dan09].

Bei bekanntem Zinssatz kann der Zinsfaktor für das Modell berechnet werden.

$$\text{Zinsfaktor} = (1 + \text{Zinssatz})^{\text{Produktlebensdauer} - 1 \text{ Jahr}} = (1 + 10\%)^{7-1}$$

$$= 1,7716$$

mit

Zinssatz = 10%

Produktlebensdauer = 7 Jahre

Die Berechnung der Bestandskosten lifetime je Fertigungssystem ist in Abbildung 4-22 beschrieben und entspricht dem Produkt aus der Bestandsmenge, Bestandskosten pro Teil und den beiden Faktoren für Zinsen und Lager.

Die Bestandsmenge (unmittelbar) nach einem Fertigungssystem ist die Summe aus dem durchschnittlichen Umlaufbestand und dem dazugehörigen Sicherheitsbestand.

Die Bestandskosten pro Teil setzen sich aus den drei Elementen Material, Maschinen und Personal zusammen:

Bestandskosten Material pro Teil aus dem jeweiligen Fertigungssystem vereint die Kosten von Metallen, Kunststoffen und galvanisch aufgetragenen Metallen. Erst wenn in dem Fertigungssystem auch das entsprechende Material verarbeitet worden ist, fließt es auch in die Berechnung eines Fertigungssystems mit ein.

Bestandskosten pro Teil sind die entstandenen Kosten durch das Betreiben der Fertigungssysteme. Dazu zählen die Maschinen- und Personalkosten aus dem betrachteten Fertigungssystem sowie die Maschinen- und Personalkosten aller Vorgängerprozesse, die zur Erstellung der Bestandsmenge notwendig waren.

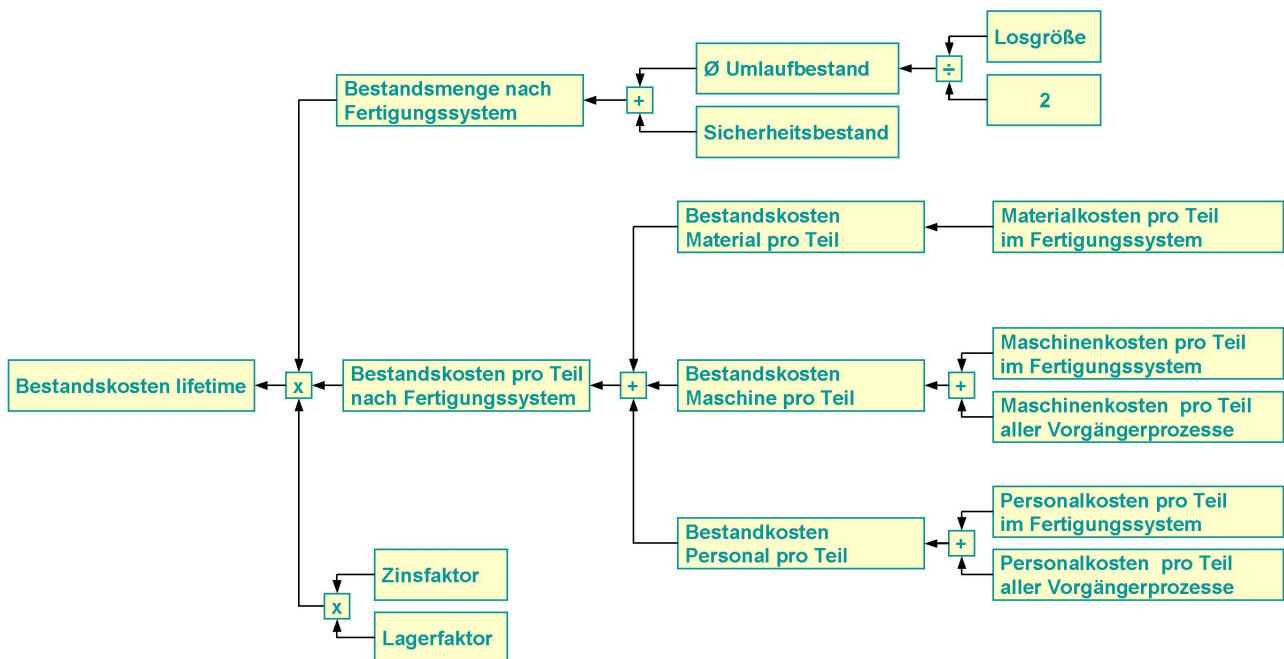


Abbildung 4-22: Bestandskosten lifetime je Fertigungssystem

Tabelle 4-6 zeigt die Berechnungsergebnisse der Bestandskosten nach der Formel in Abbildung 4-22.

Die Regeln für die Definition der Bestandsmengen für ein Fertigungssystem wurden oben bereits beschrieben und sind auf das Fallbeispiel bei einer Losgröße von 200.000 Teilen angewendet.

Die Material-, Maschinen- und Personalkosten lifetime aus den vorangegangenen Kapiteln sind vorgestellt worden und somit bekannt. Durch Division der einzelnen Kosten vom gesamten Produktlebenszeitraum durch den Teilebedarf lifetime, erhält man die Kosten pro Teil für jedes Fertigungssystem.

Die Kosten pro Teil werden mit den Bestandsmengen, dem Zinsfaktor und dem Lagerfaktor multipliziert.

Durch Addition der Bestandskosten eines Fertigungssystems von Material, Maschinen und Personal erhält man die Bestandskosten lifetime des Fertigungssystems.

Um schließlich die Gesamt-Bestandskosten für das Fertigungskonzept zu erhalten, muss die Summe aus allen Bestandskosten lifetime gebildet werden.

$$\text{Gesamt - Bestandskosten} = \sum \text{Bestandskosten lifetime aller Fertigungssysteme}$$

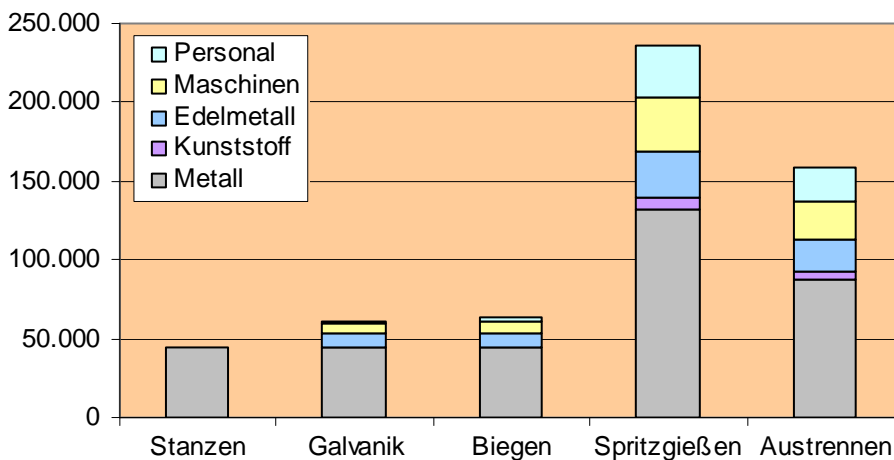
$$= 44.999 \text{ Euro} + 60.654 \text{ Euro} + 63.169 \text{ Euro} + 235.493 \text{ Euro} + 158.906 \text{ Euro}$$

$$= 563.220 \text{ Euro}$$

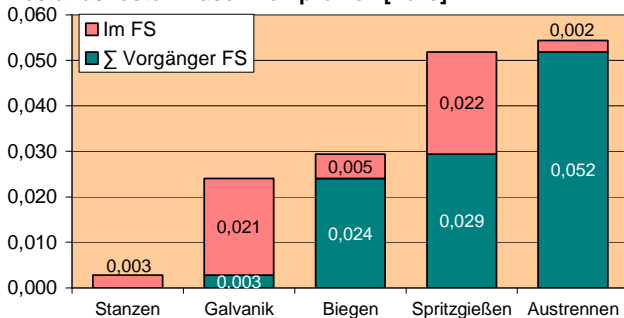
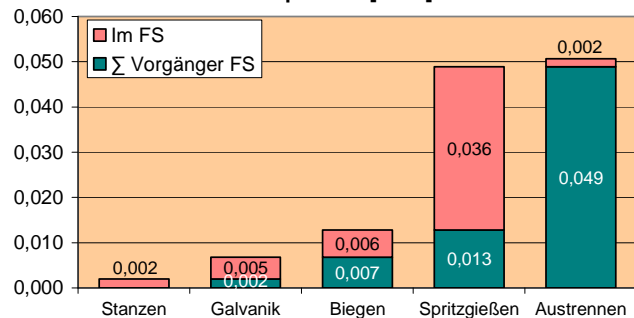
Zinsfaktor = 1,7716		Fertigungssysteme im Fertigungskonzept				
Lagerfaktor = 1,2500		FS 1	FS 2	FS 3	FS 4	FS 5
		Stanzen	Galvanik	Biegen	Spritzgießen	Austrennen
Bestandsmenge [Teile]	Ø Umlauf	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
	Sicherheit	0	0	0	200.000	100.000
	Summe	100.000	100.000	100.000	300.000	200.000
Bestandskosten Material [Euro]	pro Teil	Metall	0,198	0,198	0,198	0,198
		Kunststoff	0	0	0,011	0,011
		Edelmetall	0	0,045	0,045	0,045
		Summe	0,198	0,243	0,243	0,254
	pro Bestandsmenge	Metall	19.850	19.850	19.850	59.549
		Kunststoff	0	0	3.219	2.146
		Edelmetall	0	4.455	13.366	8.911
		Summe	19.850	24.305	76.134	50.756
	pro Bestandsmenge mit Zinsfaktor mit Lagerfaktor	Metall	43.956	43.956	43.956	131.868
		Kunststoff	0	0	7.129	4.752
		Edelmetall	0	9.866	29.599	19.733
		Summe	43.956	53.822	168.596	112.397
	Summe	432.593				
Bestandskosten Maschinen [Euro]	pro Teil	Im FS	0,003	0,021	0,005	0,022
		Σ Vorgänger FS	0	0,003	0,024	0,029
		Summe	0,003	0,024	0,029	0,052
	pro Bestandsmenge	Im FS	276	2.126	537	492
		Σ Vorgänger FS	0	276	2.402	10.370
		Summe	276	2.402	2.939	10.862
	pro Bestandsmenge mit Zinsfaktor mit Lagerfaktor	Im FS	610	4.708	1.189	14.924
		Σ Vorgänger FS	0	610	5.318	19.522
		Summe	610	5.318	6.507	24.054
	Summe	70.936				
Bestandskosten Personal [Euro]	pro Teil	Im FS	0,002	0,005	0,006	0,036
		Σ Vorgänger FS	0	0,002	0,007	0,013
		Summe	0,002	0,007	0,013	0,049
	pro Bestandsmenge	Im FS	195	488	599	10.808
		Σ Vorgänger FS	0	195	683	3.846
		Summe	195	683	1.282	14.655
	pro Bestandsmenge mit Zinsfaktor mit Lagerfaktor	Im FS	432	1.081	1.326	23.935
		Σ Vorgänger FS	0	432	1.513	8.517
		Summe	432	1.513	2.839	32.452
	Summe	59.691				
Bestandskosten lifetime [Euro]		44.999	60.654	63.169	235.493	158.906
Gesamt-Bestandskosten [Euro]		563.220				

Tabelle 4-6: Berechnungsergebnisse der Bestandskosten aus dem Fallbeispiel

Die Zusammensetzung der Bestandskosten lifetime aus dem Fallbeispiel ist in Abbildung 4-23 grafisch dargestellt. Die Kosten für Material überwiegen den Kosten von Maschinen und Personal.

Bestandskosten lifetime in Euro**Abbildung 4-23: Bestandskosten lifetime am Fallbeispiel**

Das Metall wird in allen Fertigungssystemen verarbeitet und erzeugt die höchsten Bestandskosten. Kunststoff und Edelmetall verursachen erst ab ihrem Verarbeitungszeitpunkt Bestandskosten. Der Kostenanstieg in den letzten beiden Fertigungssystemen hängt maßgeblich mit den definierten Sicherheitsbeständen zusammen. Zusätzlich steigen die Bestandskosten für Maschinen und Personal pro Teil mit zunehmender Anzahl der Fertigungsschritte. Im Fallbeispiel hat das letzte Fertigungssystem zwar die kürzeste effektive Zykluszeit, aber es beinhaltet auch die Kosten der vorangegangenen Produktionsschritte und besitzt daher die höchsten Bestandskosten Maschinen und Personal pro Teil aller Fertigungssysteme (siehe Abbildung 4-24 bzw. Tabelle 4-6).

Bestandskosten Maschinen pro Teil [Euro]**Bestandskosten Personal pro Teil [Euro]****Abbildung 4-24: Bestandskosten für Maschinen und Personal mit zunehmender Fertigungstiefe**

Die bekannten Einflussmöglichkeiten auf Maschinen-, Personal- und Materialkosten wirken anteilig auch auf die Kosten pro Teil und folglich auch auf die Bestandskosten.

Weiterhin gibt es Einflüsse durch die Anzahl der Produktionsschritte zur Herstellung des Fertigteils. Jeder Produktionsschritt sorgt für einen Umlaufbestand, d.h. ein Fertigungskonzept mit autarken Produktionsprozessen (z.B. Reel-to-Reel System) hat höhere Bestandsmengen als gekoppelte Produktionsprozesse (z.B. Reel-to-Line System). Eine Reduzierung der Lagerorte führt daher gleichzeitig zu einer Reduzierung der Bestandsmengen. Ob bei unterschiedlichen Fertigungskonzepten die niedrigeren Bestandsmengen auch zu geringeren Gesamt-Kosten im Fertigungskonzept führen, kann durch die Anwendung der beschriebenen Vorgehensweise im Modell durch

die Gesamtbetrachtung von Maschinen-, Material- und Personalkosten der Bestände analysiert werden.

Ebenso kann die Bestandsmenge durch die Losgröße beeinflusst werden. Eine kleine Losgröße bewirkt eine Verringerung der Bestandsmenge und -kosten, dafür steigen die Anzahl der Rüstvorgänge und -kosten.

4.3.7 Rüsten

Rüstkosten entstehen bei jedem Rüstvorgang durch einen Produktwechsel auf einem Fertigungssystem. Die Rüstkosten eines Rüstvorgangs sind unabhängig von der Losgröße [Ada98]. Die Rüstkosten über den gesamten Produktlebenszyklus sind jedoch abhängig von der Losgröße, weil ihnen u.a. die Rüstzeit aller Rüstvorgänge zu Grunde liegt. Übergreifend setzen sich die Rüstkosten lifetime aus dem Produkt von Anzahl Rüstvorgänge lifetime und Rüstkosten pro Rüstvorgang zusammen (siehe Abbildung 4-25).

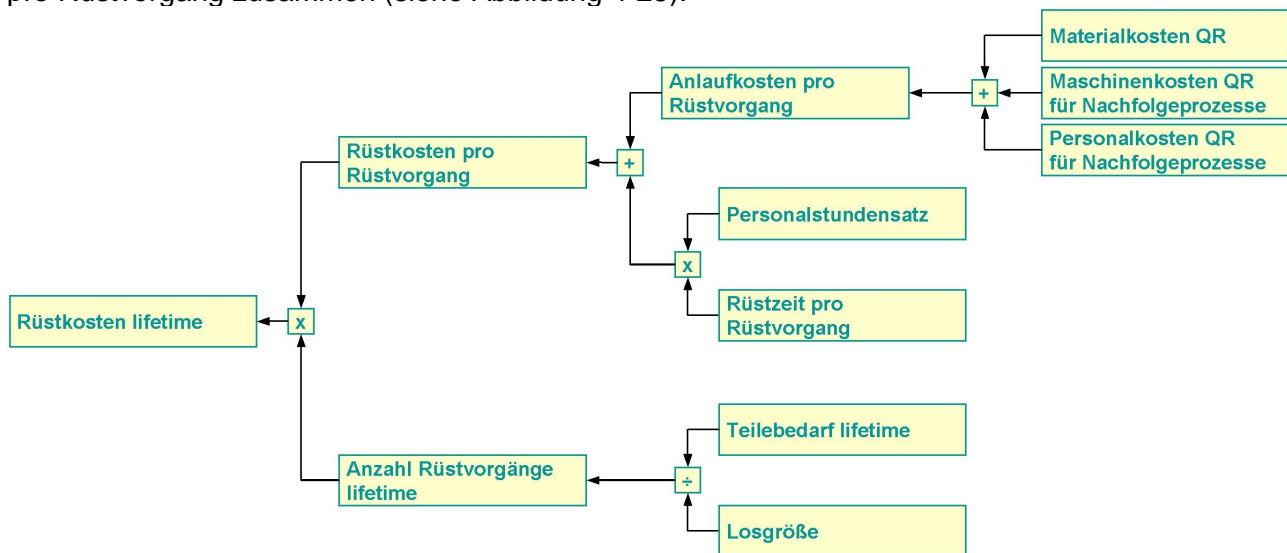


Abbildung 4-25: Rüstkosten lifetime je Fertigungssystem

Die Rüstkosten pro Rüstvorgang sind die Summe aus den Anlaufkosten und dem Personalstundensatz multipliziert mit der Rüstzeit pro Rüstvorgang. An dieser Stelle wird davon ausgegangen, dass die Rüstzeit pro Rüstvorgang den gesamten Produktlebenszyklus über konstant bleibt.

Anlaufkosten sind beim Rüstvorgang entstehende Mehrkosten durch die bereits definierten Qualitätsverluste beim Rüsten (QR). Darunter fallen zusätzliche Materialkosten beim Rüstvorgang und längere Maschinenlaufzeiten (vgl. [Ada98, GT05]).

Die NEE-Systematik beinhaltet das Rüsten nicht und somit auch keine Rüstkosten. Folglich enthält der Teilebedarf lifetime kombiniert mit dem Q-Faktor keinen Anfahrschrott, was aber jetzt durch die Materialkosten Qualitätsverluste Rüsten abgebildet wird.

Tabelle 4-7 zeigt die Berechnungsergebnisse nach der Formel aus Abbildung 4-25. Die Menge des abgeschätzten Anfahrschrotts ist aus dem Wertstromdesign übernommen (vgl. Abbildung 4-8).

Es muss bedacht werden, dass die Nachfolgeprozesse ebenso Anfahrschrott während des Rüstvorgangs verursachen. Ein Fertigungssystem muss den Anfahrschrott seiner Nachfolgeprozesse mitproduzieren, was zu einem Anstieg von Maschinenkosten und Personalkosten führt. Die Material-, Maschinen- und Personalkosten pro Teil sind aus Kapitel 4.3.6 bereits bekannt. Im Folgenden wird eine Beispielberechnung der Anlaufkosten pro Rüstvorgang am Fertigungssystem eins aus dem Fallbeispiel durchgeführt.

- Materialkosten QR pro Rüstvorgang

$$\begin{aligned}\text{Materialkosten } QR_{FS1} &= \text{Materialkosten pro Teil}_{FS1} \cdot QR_{FS1} = 0,198 \frac{\text{Euro}}{\text{Teil}} \cdot 100 \text{ Teile} \\ &= 19,8 \text{ Euro}\end{aligned}$$

mit

$$QR_{FS1} = 100 \text{ Teile}$$

$$\text{Materialkosten pro Teil}_{FS1} = 0,198 \frac{\text{Euro}}{\text{Teil}}$$

- Maschinenkosten QR für Nachfolgeprozesse pro Rüstvorgang

$$\begin{aligned}\text{Maschinenkosten } QR_{FS1} \text{ für Nachfolgeprozesse} &= \text{Maschinenkosten pro Teil}_{FS1} \cdot \sum QR_{FS2 \text{ bis } FS5} \\ &= 0,003 \frac{\text{Euro}}{\text{Teil}} \cdot 2.800 \text{ Teile} \\ &= 7,72 \text{ Euro}\end{aligned}$$

mit

$$\sum QR_{FS2 \text{ bis } FS5} = QR_{FS2} + QR_{FS3} + QR_{FS4} + QR_{FS5} = 2.800 \text{ Teile}$$

$$\text{Maschinenkosten pro Teil}_{FS1} = 0,003 \frac{\text{Euro}}{\text{Teil}}$$

- Personalkosten QR für Nachfolgeprozesse pro Rüstvorgang

$$\begin{aligned}\text{Personalkosten } QR_{FS1} \text{ für Nachfolgeprozesse} &= \text{Personalkosten pro Teil}_{FS1} \cdot \sum QR_{FS2 \text{ bis } FS5} \\ &= 0,002 \frac{\text{Euro}}{\text{Teil}} \cdot 2.800 \text{ Teile} \\ &= 5,47 \text{ Euro}\end{aligned}$$

mit

$$\sum QR_{FS2 \text{ bis } FS5} = QR_{FS2} + QR_{FS3} + QR_{FS4} + QR_{FS5} = 2.800 \text{ Teile}$$

$$\text{Personalkosten pro Teil}_{FS1} = 0,002 \frac{\text{Euro}}{\text{Teil}}$$

Zur Ermittlung der Anlaufkosten pro Rüstvorgang $_{FS1}$ werden die Materialkosten QR_{FS1} , die Maschinenkosten QR_{FS1} für Nachfolgeprozesse und die Personalkosten QR_{FS1} für Nachfolgeprozesse addiert. Das Fertigungssystem eins des Fallbeispiels besitzt Anlaufkosten pro Rüstvorgang in Höhe von 33,03 Euro. Fertigungssystem zwei hingegen benötigt Anlaufkosten pro Rüstvorgang von 615,47 Euro, was maßgeblich mit den Materialkosten und der Menge vom Anfahrschrott (2.500 Teile pro Rüstvorgang) des Fertigungssystems zwei zusammenhängt.

Stanzgitter- oder auch Vollbandgalvaniken haben den Nachteil, dass Teile im Prozess parallel bearbeitet werden. Bis das erste Teil am Ende des Anlagendurchlaufs qualitativ geprüft werden kann, hat die Bearbeitung der sich in der gesamten Anlagenstrecke befindlichen Teile bereits begonnen. Eine Änderung der Prozessparameter erfordert dann ein erneutes Prüfen nach einem weiteren Anlagendurchlauf. Besitzt z.B. ein Stanzgitter einen Teilevorschub von 30mm so entsprechen 2.500 Teile einer Strecke 75m. Diese Distanz kann durchaus die Länge einer Galvanikanlage ausmachen.

Durch die bekannten Werte des Personalstundensatzes, der Rüstzeit pro Rüstvorgang, dem Teilebedarf lifetime und der ausgewählten Losgröße aus dem Wertstromdesign (vgl. Abbildung 4-8), können die Personalkosten pro Rüstvorgang und die Anzahl Rüstvorgänge lifetime berechnet werden.

$$\begin{aligned}\text{Personalkosten}_{FS1} &= \text{Personalstundensatz}_{FS1} \cdot \text{Rüstzeit}_{FS1} = 30,10 \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \cdot 3 \text{ h} \\ &= 90,30 \text{ Euro}\end{aligned}$$

mit

$$\begin{aligned}\text{Personalstundensatz}_{FS1} &= 30,10 \frac{\text{Euro}}{\text{h}} \\ \text{Rüstzeit}_{FS1} &= 3 \text{ h}\end{aligned}$$

Damit entsprechen im ersten Fertigungssystem die Rüstkosten pro Rüstvorgang 123,33 Euro.

Die Anzahl der Rüstvorgänge lifetime ist der Quotient aus Teilebedarf lifetime zur Losgröße und ist im Modell für alle Fertigungssysteme gleich. Mit einem Teilebedarf lifetime von 16,8 Mio. Teilen und einer Losgröße von 200.000 Teilen sind im gesamten Produktlebenszyklus 84 Rüstvorgänge erforderlich.

Die Rüstkosten lifetime können aus dem Produkt von Anzahl Rüstvorgänge lifetime und Rüstkosten pro Rüstvorgang berechnet werden. Fertigungssystem eins aus dem Fallbeispiel benötigt 10.360 Euro Rüstkosten im gesamten Produktlebenszyklus.

Um schließlich die Gesamt-Rüstkosten für das Fertigungskonzept zu erhalten, müssen alle Rüstkosten lifetime der Fertigungssysteme miteinander addiert werden.

Gesamt -Rüstkosten = \sum Rüstkosten lifetime aller Fertigungssysteme

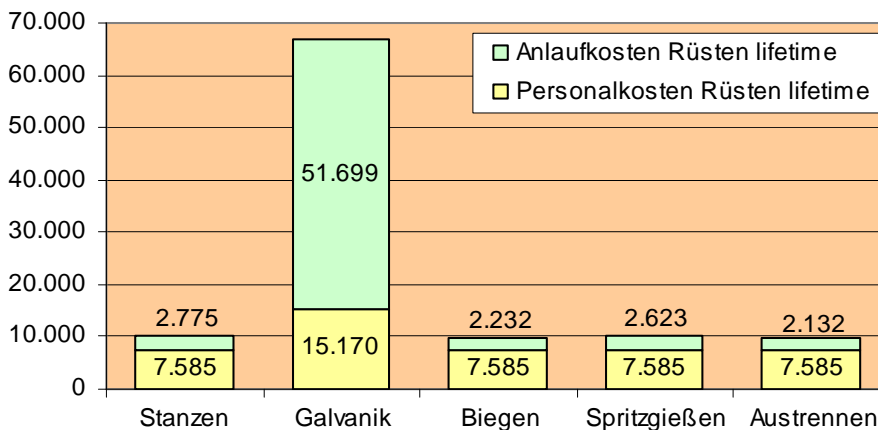
= 10.360 Euro + 66.870 Euro + 9.818 Euro + 10.208 Euro + 9.717 Euro

= 106.973 Euro

		Fertigungssysteme im Fertigungskonzept				
		FS 1	FS 2	FS 3	FS 4	FS 5
		Stanzen	Galvanik	Biegen	Spritzgießen	Austrennen
Anzahl Teile QR im FS		100	2.500	100	100	100
Anzahl Teile QR der Nachfolger FS		2.800	300	200	100	0
Anlaufkosten pro Rüstvorgang [Euro]	Materialkosten pro Teil	0,198	0,243	0,243	0,254	0,254
	Materialkosten QR im FS	19,85	607,63	24,31	25,38	25,38
	Maschinenkosten pro Teil	0,003	0,021	0,005	0,022	0,054
	Maschinenkosten QR \sum Nachfolger FS	7,72	6,38	1,07	2,25	0,00
	Personalkosten pro Teil	0,002	0,005	0,006	0,036	0,002
	Personalkosten QR \sum Nachfolger FS	5,47	1,46	1,20	3,60	0,00
	Summe	33,03	615,47	26,58	31,23	25,38
Personalkosten pro Rüstvorgang [Euro]	Personalstundensatz [Euro/h]	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1
	Rüstzeit pro Rüstvorgang [h]	3	6	3	3	3
		90,3	180,6	90,3	90,3	90,3
Rüstkosten pro Rüstvorgang [Euro]		123,33	796,07	116,88	121,53	115,68
Anzahl Rüstvorgänge lifetime	Teilebedarf lifetime	16.800.000	16.800.000	16.800.000	16.800.000	16.800.000
	Losgröße	200.000	200.000	200.000	200.000	200.000
		84	84	84	84	84
Rüstkosten lifetime [Euro]		10.360	66.870	9.818	10.208	9.717
Gesamt-Rüstkosten [Euro]		106.973				

Tabelle 4-7: Berechnungsergebnisse der Rüstkosten aus dem Fallbeispiel

In Abbildung 4-26 sind die Rüstkosten lifetime je Fertigungssystem nach Anlaufkosten und Personalkosten getrennt aufgeführt. Bei gleichbleibenden Personalstundensatz führt eine Verdopplung der Rüstzeit auch zu einer Verdopplung der Personalkosten Rüsten, wie bei dem Fertigungssystem der Galvanik erkennbar ist. Dass weiterhin die Anlaufkosten einen bedeutenden Anteil der Rüstkosten eines Fertigungssystems ausmachen können, zeigt auch das Fertigungssystem zwei. Die Fertigungstechnologie und Prozessgestaltung einer Galvanikanlage, vor allem das beim Rüsten notwendige Material zum Einstellen des Serienprozesses, führen im Fallbeispiel zu höheren Rüstkosten im Vergleich zu den anderen Fertigungssystemen.

Rüstkosten lifetime in Euro**Abbildung 4-26: Rüstkosten lifetime am Fallbeispiel**

Die Rüstkosten lifetime werden zudem durch die Anzahl der Rüstvorgänge beeinflusst. Mit abnehmender Anzahl der Rüstvorgänge bei konstantem Teilebedarf lifetime sinken auch die Rüstkosten lifetime. Dafür steigt die Losgröße und folglich die Bestandskosten. Hierzu folgt später noch ein Beispiel zur Optimierung der Losgröße.

4.3.8 Werkzeuge

Der Einfluss der Werkzeugkosten kann einen entscheidenden Kostenblock für das Fertigungskonzept darstellen. Vor allem bei kleineren Stückzahlen erhalten die Werkzeugkosten zunehmend Gewicht.

Allgemein sollten für die Berechnung der Werkzeugkosten die Kosten für die Konstruktion, für das Material des Werkzeugs, für die Maschinen und Lohn sowie für die Erprobung (Bemusterung) enthalten sein [MBL95].

Die Bemusterung beinhaltet die Inbetriebnahme vom Testbetrieb bis zur Serienfreigabe des hergestellten Werkzeuges. Speziell Spritzgießwerkzeuge sind oft mit mehreren Kavitäten ausgestattet. Diese gesteigerte Komplexität erhöht die Kosten für die Werkzeugherstellung und die Bemusterungskosten [Ree02].

Während der Bemusterungsphase können nicht unerhebliche finanzielle Aufwände oder auch zeitliche Auswirkungen auftreten. Gerade bei mehrstufigen Fertigungssystemen kann es vorkommen, dass z.B. im letzten Fertigungssystem ein Problem entdeckt wird, welches im ersten Fertigungssystem entstanden ist. In solchen Fällen werden Korrekturen möglicherweise an mehreren Werkzeugen durch die gesamte Prozesskette nötig. Eventuell sind auch die bereits produzierten Zwischenzustände nicht mehr verwendbar und das Material aus den Beständen muss verschrottet werden.

Weiterhin gelten die Instandhaltungskosten eines Werkzeuges als wichtiger Bestandteil für die Kostenbetrachtung [MMM00]. Das gilt für Spritzgieß- und ebenso für Stanzwerkzeuge. Die Galvanik kann ebenfalls Werkzeuge bzw. Hilfswerkzeuge einsetzen, um z.B. Oberflächen-

beschichtungen selektiv aufzubringen. Ihr Einsatz ist oftmals vielseitig für ein größeres Produktspektrum.

In den meisten Fällen werden die Werkzeugkosten nicht über eine Produktstückzahl amortisiert, sondern separat in Rechnung gestellt, spätestens zum Einsatz bei Serienproduktion [Bry97].

Die Details zur Kalkulation bzw. Einschätzung der Werkzeugkosten werden an dieser Stelle nicht weiter behandelt. Wichtig ist aber der Umgang mit den Werkzeugkosten für den gesamten Produktlebenszyklus. Die unterschiedlichen Fertigungssysteme erfordern unterschiedliche Werkzeugkonzepte und einige von ihnen sogar zu Serienbeginn eine größere Anzahl an Werkzeugen (wie z.B. das WT-Umlaufsystem mit mehreren Werkzeugunterteilen). Daher ist es im Gesamtkontext wichtig, die Lebensdauer der Werkzeuge bei der Kostenfindung mit einzubeziehen. Die Lebensdauer (LD) beschreibt die mögliche Anzahl der Teile, die mit dem Werkzeug produziert werden können. Für die Lebensdauer sind die verwendeten Werkstoffe (z.B. Hartmetall) von großer Bedeutung. Auch spezielle Beschichtungen der Werkzeugeinsätze können den Verschleiß durch ihre Härte vermindern und zu einer Erhöhung der Lebensdauer beitragen (vgl. [Gas07, KEV08]). Hat ein (Grund-)Werkzeug seine Lebensdauer erreicht, so muss für die Aufrechterhaltung der weiteren Produktion ein neues (Ersatz-)Werkzeug gebaut werden. Die Herstellung erfolgt auf einer bereits bekannten Konstruktion und wird in diesem Modell mit einem pauschalen Anteil von 30% gewichtet. Somit sind für das Ersatz-Werkzeug noch 70% der Kosten des Grund-Werkzeugs für die erneute Umsetzung nötig. Es wird davon ausgegangen, dass die Lebensdauern von Grund- und Ersatz-Werkzeug sich nicht unterscheiden. Damit setzen sich die Werkzeugkosten lifetime, wie in Abbildung 4-27 dargestellt, aus allen Grund- und Ersatz-Werkzeugkosten eines Fertigungssystems zusammen.

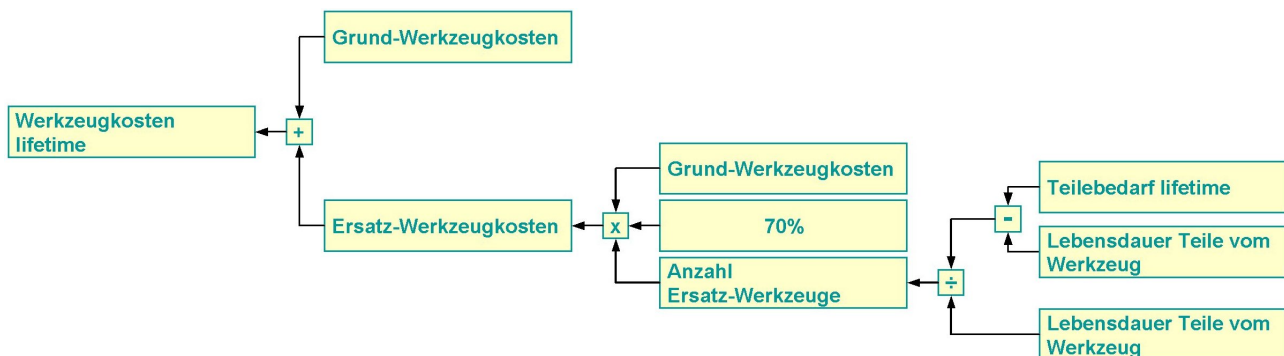


Abbildung 4-27: Werkzeugkosten lifetime je Fertigungssystem

Zum Start der Serienproduktion gibt es immer ein Grund-Werkzeug mit einem zugehörigen Preis. Abhängig von der Lebensdauer der Werkzeuge und dem Teilebedarf lifetime kann ausgerechnet werden, wie viele Ersatz-Werkzeuge notwendig sind. Dabei kann es in der Praxis nur eine ganze Anzahl an Werkzeugen geben und die errechneten Werte müssen aufgerundet werden (siehe Tabelle 4-8).

Durch Addition aller Werkzeugkosten lifetime aus allen Fertigungssystemen erhält man die Gesamt-Werkzeugkosten, welche im Fallbeispiel 335.500 Euro entsprechen.

Gesamt - Werkzeugkosten = \sum Werkzeugkosten lifetime aller Fertigungssysteme

= 85.000 Euro + 0 Euro + 40.000 Euro + 168.000 Euro + 42.500 Euro

= 335.500 Euro

Fertigungssysteme im Fertigungskonzept					
	FS 1	FS 2	FS 3	FS 4	FS 5
	Stanzan	Galvanik	Biegen	Spritzgießen	Austrennen
Teilebedarf lifetime	16.800.000	16.800.000	16.800.000	16.800.000	16.800.000
Lebensdauer Werkzeug [Anzahl Teile]	30.000.000	0	30.000.000	6.000.000	10.000.000
Anzahl Werkzeuge lifetime	0,6	0	0,6	2,8	1,7
Anzahl Grund-Werkzeuge	1,0	0	1,0	1,0	1,0
Grund-Werkzeugkosten [Euro]	85.000	0	40.000	70.000	25.000
Anzahl Ersatz-Werkzeuge	0	0	0	1,8	0,7
Anzahl Ersatz-Werkzeuge aufgerundet	0	0	0	2,0	1,0
Ersatz-Werkzeugkosten [Euro]	0	0	0	98.000	17.500
Werkzeugkosten lifetime [Euro]	85.000	0	40.000	168.000	42.500
Gesamt-Werkzeugkosten [Euro]	335.500				

Tabelle 4-8: Berechnungsergebnisse der Werkzeugkosten aus dem Fallbeispiel

Ersatz-Werkzeuge sind im Fallbeispiel lediglich für die letzten beiden Prozessschritte notwendig (siehe Tabelle 4-8 und Abbildung 4-28). Spritzgießwerkzeuge haben in der Regel eine kürzere Lebensdauer als Stanzwerkzeuge. Beispielsweise können Werkzeugeteile wie Stanzstempel und Schnittplatte bei entsprechender Auslegung mehrmals nachgeschliffen werden, um die ursprüngliche Maßhaltigkeit des Stanzteiles wiederherzustellen. Formeinsätze von Spritzgießwerkzeugen hingegen können nur bedingt oder nicht nachgearbeitet werden, weil durch einen Abtrag an der Oberfläche der Formeinsätze sich auch die Kontur eines Kunststoffteiles ändert. Neben der Lebensdauer von Werkzeugen hat auch der Teilebedarf lifetime Einfluss auf die notwendige Anzahl an Werkzeugen im gesamten Produktlebenszyklus.

Werkzeugkosten lifetime in Euro

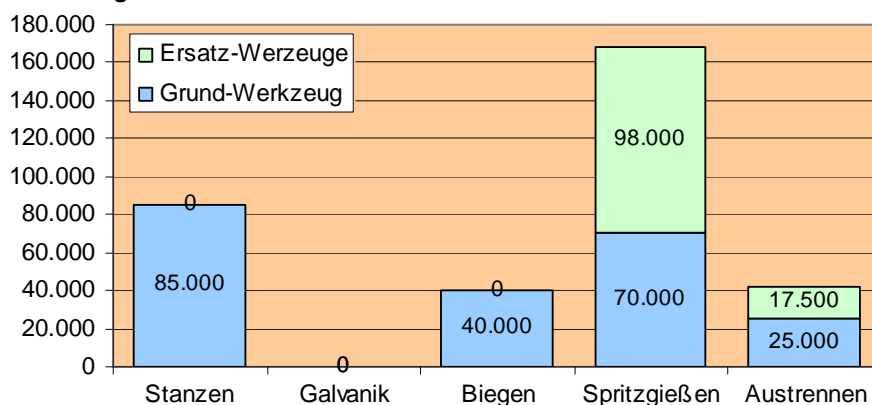


Abbildung 4-28: Werkzeugkosten lifetime am Fallbeispiel

Im Fallbeispiel ist zum Beginn der Serienproduktion eine Startinvestition von 220.000 Euro für alle Grund-Werkzeuge erforderlich. Mit zunehmendem Teilebedarf steigen auch die Kosten für die anfallenden Ersatz-Werkzeuge in Abhängigkeit ihrer Lebensdauer. Abbildung 4-29 zeigt die Grund-Werkzeugkosten und die kumulierten Ersatz-Werkzeugkosten bei unterschiedlichen Teilebedarfen. Hier ist die Wichtigkeit der Betrachtung der Werkzeugkosten für den gesamten Produktlebenszeitraum erkennbar. Im Fallbeispiel sind die Gesamt-Werkzeugkosten bei ca. 25 Mio. Teilen bereits doppelt so hoch wie die Startinvestition an Grund-Werkzeugen.

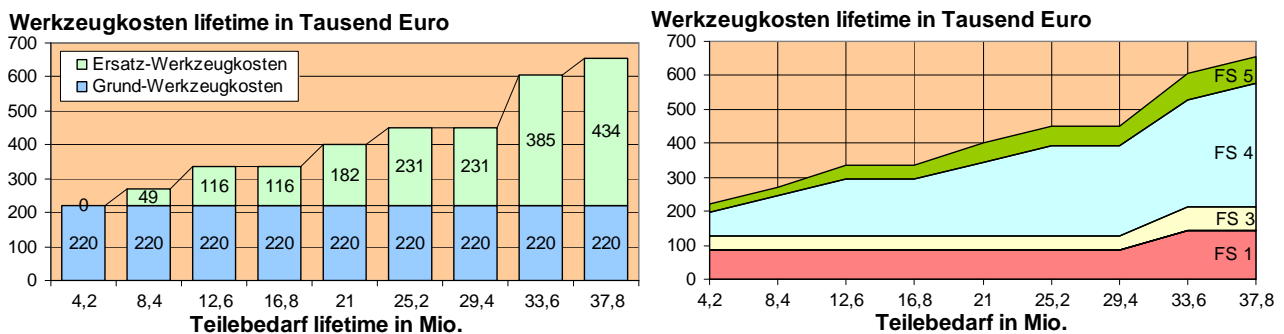
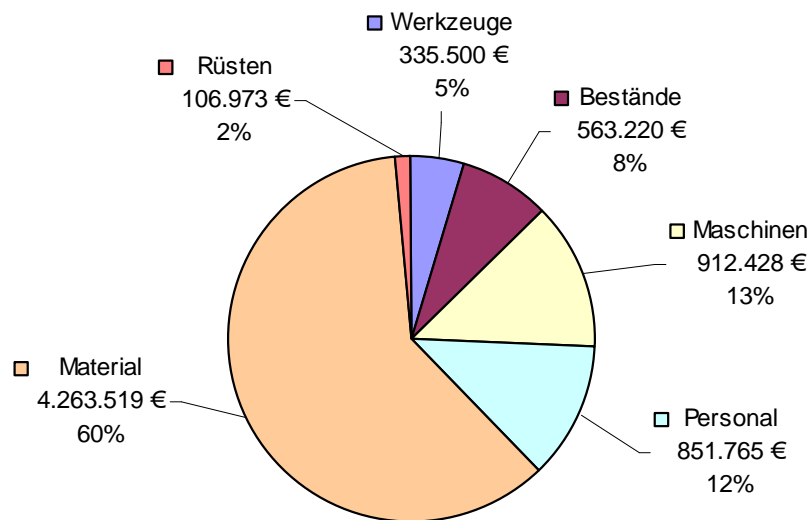


Abbildung 4-29: Einfluss des Teilebedarfs auf die Gesamt-Werkzeugkosten lifetime

Werkzeuge sind ein Bestandteil eines Fertigungssystems und beeinflussen deren Performance. Somit ist die integrierte Effektivitätsbetrachtung von Werkzeugen im Fertigungssystem sinnvoll. Günstige Werkzeuge können vielleicht zeitweise mit kurzer Zykluszeit in der Produktion eingesetzt werden. Wenn diese dann aber häufigen Wartungszyklen und Reparaturen unterliegen, ist dies nicht optimal [RC06]. Ebenso sind die produzierte Teilequalität sowie die Zuverlässigkeit wichtige Punkte bei der Auswahl von Werkzeugkonzepten und sollten wirtschaftlich nicht unterschätzt werden [JM04]. Daher müssen Werkzeugkosten in der Gesamtheit mit den übrigen Kostenrubriken betrachtet werden.

4.3.9 Modellergebnis des Fallbeispiels

Werden alle Gesamtkosten von Maschinen, Personal, Material, Beständen, Rüsten und Werkzeugen addiert, so erhält man die Kosten für das Fertigungskonzept. Im Fallbeispiel betragen die Kosten für das Fertigungskonzept insgesamt 7.033.404 Euro. In Abbildung 4-30 ist die Kostenverteilung dargestellt. Die Kosten für Material überwiegen mit 60 Prozent der Kosten des Fertigungskonzeptes. Den zweitgrößten Anteil haben die Kosten für Maschinen, gefolgt von Personal, Beständen, Werkzeugen und Rüsten.

Kosten Fertigungskonzept lifetime**Abbildung 4-30: Kostenverteilung des Fertigungskonzeptes am Fallbeispiel**

Bevor das Fallbeispiel weiter diskutiert und optimiert wird, sind die folgenden Erklärungen über die Zusammenhänge der Einflussparameter untereinander und auf das Modellergebnis hilfreich.

4.3.10 Zusammenhänge, Abhängigkeiten und Auswirkungen der Einflussparameter

Die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Parameter beeinflussen nicht nur das Modellergebnis, sondern sie beeinflussen sich teilweise auch gegenseitig. Damit die Zusammenhänge zwischen den Änderungsmöglichkeiten der Eingangsparameter und des Modellergebnisses transparenter werden, ist es notwendig, die wechselseitigen Abhängigkeiten der Parameter untereinander aufzuzeigen. Tabelle 4-9 beinhaltet in einer Übersicht die wechselseitigen Zusammenhänge und Abhängigkeiten der Einflussparameter. Werden die Werte in der horizontalen Ebene verändert (hier beispielhaft erhöht), so sind die Auswirkungen auf die anderen Parameter in der vertikalen Ebene ablesbar. Die Effekte sind in Tabelle 4-9 tendenziell beschrieben, weil die Wertigkeit einer Änderung von der Höhe der Änderung und von der ausgewählten Konstellation des Fertigungskonzeptes abhängig ist.

			Teilebedarf lifetime	Produktlebenszeit	Materialeinsatz	Maschinenstundensatz	Personalstundensatz	Zykluszeit	Rüstzeit	Verfügbarkeits-Faktor	Leistungs-Faktor	Qualitäts-Faktor	Qualitätsverlust Rüsten	Losgröße	Bestandsmenge	Grund-Werkzeug	Lebensdauer Werkzeuge	Zinsen bzw. Zinsfaktor	Lagerfaktor	Rohstoffpreise
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
▲	1	Teilebedarf lifetime		-	-	▼	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
▲	2	Produktlebenszeit	▲		-	▼	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	▲	-	-
▲	3	Materialeinsatz	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
▲	4	Maschinenstundensatz	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
▲	5	Personalstundensatz	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
▲	6	Zykluszeit	-	-	-	▼	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
▲	7	Rüstzeit	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
▲	8	Verfügbarkeits-Faktor	-	-	-	▲	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
▲	9	Leistungs-Faktor	-	-	-	▲	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-
▲	10	Qualitäts-Faktor	-	-	-	▲	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-
▲	11	Qualitätsverlust Rüsten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-
▲	12	Losgröße	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		▲	-	-	-	-	-
▲	13	Bestandsmenge	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
▲	14	Grund-Werkzeug	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-
▲	15	Lebensdauer Werkzeuge	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	▲		-	-	-
▲	16	Zinsen bzw. Zinsfaktor	-	-	-	▲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-
▲	17	Lagerfaktor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-
▲	18	Rohstoffpreise	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

▲ Erhöhung

▼ Verringerung

- ohne Auswirkung

Tabelle 4-9: Übersicht der Zusammenhänge und Abhängigkeiten von den Einflussparametern

Hier folgen die Erläuterungen für die Beziehung der sich gegenseitig beeinflussenden Parameter.

- Teilebedarf lifetime

Eine Erhöhung des Teilebedarfs lifetime führt zu einer längeren Maschinenlaufzeit und der Maschinenstundensatz sinkt.

- Produktlebenszeit

Erhöht sich die Produktlebenszeit bei gleich bleibendem Kundentakt, so erhöht sich auch der Teilebedarf lifetime, dessen Auswirkung oben bereits erläutert wurde. Die längere Produktlebenszeit geht als Exponent in die Berechnung des Zinsfaktors ein und lässt diesen entsprechend ansteigen.

- Zykluszeit

Die Zykluszeit wirkt sich auf die Maschinenlaufzeit aus und führt bei einer Erhöhung zu einer längeren Laufzeit und damit zu einem niedrigeren Maschinenstundensatz.

- Verlust-Faktoren Verfügbarkeit, Leistung und Qualität

Eine Reduzierung der Verluste führt bei gleich bleibender Zykluszeit zu einer kürzeren effektiven Zykluszeit und damit zu einer Verkürzung der Maschinenlaufzeit, welche den Maschinenstundensatz erhöht.

- Losgröße

Eine Vergrößerung der Losgröße erhöht den durchschnittlichen Umlaufbestand und den Sicherheitsbestand (vgl. auch Kapitel 4.3.6).

- Lebensdauer Werkzeuge

Mit Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer von Werkzeugen steigen in der Regel die Kosten für Grund-Werkzeuge. Mit einer Erhöhung der Werkzeuglebensdauer kann (in Abhängigkeit vom Teilebedarf) aber ggfs. die notwendige Anzahl an Werkzeugen reduziert werden.

- Zinsen

Durch eine Steigerung der Zinsen erhöhen sich die kalkulatorischen Zinskosten pro Jahr für die jährlichen Maschinenkosten und damit der Maschinenstundensatz.

Nachdem die Zusammenhänge der Parameter untereinander bekannt sind, ist weiterführend deren Wirkungsweise auf das Modellergebnis für jede einzelne Kostenkategorie interessant.

Tabelle 4-10 stellt die tendenziellen Auswirkungen bei Änderung eines Einflussparameters dar. Der konkrete Änderungsbetrag ist abhängig von der Änderungshöhe und dem gewählten Fertigungskonzept mit seinen hinterlegten Einflussparametern.

			Kosten lifetime					
			Maschinen	Personal	Material	Bestände	Rüsten	Werkzeuge
			1	2	3	4	5	6
▲	1	Teilebedarf lifetime	▲	▲	▲	▼	▲	▲
▲	2	Produktlebenszeit	▲	▲	▲	▲	▲	▲
▲	3	Materialeinsatz	-	-	▲	▲	▲	-
▲	4	Maschinenstundensatz	▲	-	-	▲	▲	-
▲	5	Personalstundensatz	-	▲	-	▲	▲	-
▲	6	Zykluszeit	▲	▲	-	▲	▲	-
▲	7	Rüstzeit	-	-	-	-	▲	-
▲	8	Verfügbarkeits-Faktor	▼	▼	-	▼	▼	-
▲	9	Leistungs-Faktor	▼	▼	-	▼	▼	-
▲	10	Qualitäts-Faktor	▼	▼	▼	▼	▼	-
▲	11	Qualitätsverlust Rüsten	-	-	-	-	▲	-
▲	12	Losgröße	-	-	-	▲	▼	-
▲	13	Bestandsmenge	-	-	-	▲	-	-
▲	14	Grund-Werkzeug	-	-	-	-	-	▲
▲	15	Lebensdauer Werkzeuge	-	-	-	-	-	▼
▲	16	Zinsen bzw. Zinsfaktor	▲	-	-	▲	▲	-
▲	17	Lagerfaktor	-	-	-	▲	-	-
▲	18	Rohstoffpreise	-	-	▲	▲	▲	-

▲	Erhöhung
▼	Verringerung
-	ohne Auswirkung

Tabelle 4-10: Auswirkungen der Einflussparameter auf die Kostenrubriken des Modellergebnisses

Es folgt eine Beschreibung der Auswirkungen von den Einflussparametern auf die einzelnen Kostenrubriken des Modellergebnisses.

- Teilebedarf lifetime

Ein Anstieg des Teilebedarfs lifetime entspricht einem schnelleren Kundentakt und es müssen mehr Teile im gleichen Zeitraum produziert werden. Dies führt zu einer längeren Maschinenlaufzeit und gleichzeitig zu höheren jährlichen Maschinenkosten, was zwangsweise einen Anstieg der Maschinenkosten lifetime zur Folge hat. Mit der längeren Maschinenlaufzeit steigen auch die Kosten für das Bedienpersonal.

Die an die Maschinenlaufzeit gebundenen Kosten für Energie und Betriebsstoffe steigen zwar, dennoch werden die jährlichen Maschinenkosten in der Regel vom Anschaffungswert und von den Zinsen dominiert, so dass im Verhältnis von Maschinenlaufzeit zu den jährlichen Maschinenkosten der Maschinenstundensatz sinkt. Durch den niedrigeren Maschinenstundensatz sinken bei gleicher Produktionsgeschwindigkeit die Maschinenkosten pro Teil und dadurch die Bestandskosten bei unveränderter Bestandsmenge.

Beim Rüsten sinken geringfügig die Anlaufkosten durch die geringeren Maschinenkosten pro Teil. Dafür erhöht sich aber die notwendige Anzahl der Rüstvorgänge, so dass die Rüstkosten lifetime ansteigen.

Eine größere Produktionsmenge in der Produktlebenszeit führt zu einem entsprechend höheren Materialverbrauch und daher zu einem Anstieg der Materialkosten. Weiterhin sind für die gestiegene Menge an Teilen, in Abhängigkeit von der Werkzeuglebensdauer, auch mehrere Ersatz-Werkzeuge und somit höhere Werkzeugkosten erforderlich.

- Produktlebenszeit

Ein Anstieg der Produktlebenszeit führt zu einem erhöhten Teilebedarf lifetime und somit zu den gleichen oben aufgeführten Ausprägungen für Maschinen, Personal, Material, Rüsten und Werkzeuge. Die jährlichen Maschinenkosten werden zwar durch die längere Abschreibungsdauer sinken, dafür fallen aber für einen entsprechend längeren Zeitraum Zinsen an. Die längere Abschreibungsdauer geht als Exponent in die Berechnung des Zinsfaktors ein und sorgt bei der Berechnung der Bestände für steigende Kosten, trotz der im Verhältnis gering gesunkenen Maschinenkosten pro Teil.

- Materialeinsatz und Rohstoffpreise

Eine größere Menge an Material zu einem gleichen Rohstoffpreis oder eine konstante Menge an Material zu einem teureren Rohstoffpreis führen zu einem Anstieg der Materialkosten. Die Mehrkosten an Material wirken sich zudem auch auf die Bestands- und Rüstkosten aus, weil in deren Berechnung die Materialkosten pro Teil einfließen.

Unabhängig vom Einflussparameter sind die Kostenausprägungen auf das Modellergebnis deckungsgleich, wenn die gleichen prozentualen Änderungen am jeweiligen Einflussparameter vorgenommen werden.

- Maschinenstundensatz

Steigt der Maschinenstundensatz, z.B. durch erhöhte Anschaffungswerte der Fertigungssysteme, so vergrößert sich der Anteil der Maschinenkosten lifetime und damit die Maschinenkosten pro Teil, was wiederum zu einem Anstieg der Bestands- und Rüstkosten führt.

- Personalstundensatz

Mit steigendem Personalstundensatz vergrößert sich der Anteil der Personalkosten lifetime sowie der Personalkosten pro Teil, was ebenfalls zu einer Erhöhung der Bestands- und Rüstkosten führt.

- Zykluszeit

Eine Erhöhung der Zykluszeit erhöht die effektive Zykluszeit und bedeutet eine Reduzierung der Produktionsgeschwindigkeit. Dadurch verlängert sich die Maschinenlaufzeit und sorgt für steigende jährliche Maschinenkosten sowie Maschinenkosten lifetime. Mit einer längeren Maschinenlaufzeit steigen auch die Kosten für das Bedienpersonal.

Durch die längere Maschinenlaufzeit sinkt zwar der Maschinenstundensatz, durch die reduzierte Produktionsgeschwindigkeit für eine konstante Teilmenge steigen jedoch die Kosten pro Teil hinsichtlich Maschinen und Personal und infolgedessen auch die Bestandskosten sowie die Rüstkosten.

- Rüstzeit und Qualitätsverluste Rüsten

Eine Verlängerung der Rüstzeit bzw. eine erhöhte Menge an Anfahrschrott sorgt für den Anstieg der Rüstkosten.

- Verlustfaktoren Verfügbarkeit, Leistung und Qualität

Eine Erhöhung einer der drei Verlustfaktoren entspricht einer Verkürzung der effektiven Zykluszeit und somit einer schnelleren Produktionsgeschwindigkeit. Die Maschinenlaufzeit verkürzt sich und die jährlichen Maschinenkosten sowie die Maschinenkosten lifetime sinken. Mit der kürzeren Maschinenlaufzeit sinken auch die Kosten für das Bedienpersonal. Durch die schnellere Produktionsgeschwindigkeit für eine gleich gebliebene Teilmenge, sinken die Kosten pro Teil für Maschinen und Personal, was zur Reduzierung von Bestands- und Rüstkosten führt. Eine Verringerung der Verluste hinsichtlich der Qualität führt zudem zu einer Reduktion der Materialkosten.

- Losgröße und Bestandsmenge

Die Losgröße beeinflusst die Rüstkosten und die Bestandskosten gegenläufig. Eine größere Losmenge führt zu einer Reduzierung der Anzahl an Rüstvorgängen im Produktlebenszeitraum und damit zu einer Verringerung der Rüstkosten.

Weiterhin erhöht sich der durchschnittliche Umlaufbestand sowie der Sicherheitsbestand und damit auch die Bestandskosten.

- Kosten Grund-Werkzeug und Lebensdauer Werkzeuge

Steigen die Kosten für das Grund-Werkzeug, so erhöhen sich damit die Werkzeugkosten lifetime. Durch eine Verlängerung der Werkzeuglebensdauer reduziert sich der Bedarf an Ersatz-Werkzeugen, was zur Verringerung der Werkzeugkosten führt.

- Zinsen bzw. Zinsfaktor

Durch eine Steigerung der Zinsen erhöhen sich die kalkulatorischen Zinskosten pro Jahr für die Maschinen sowie die Maschinenkosten pro Teil und folglich auch die Bestands- und Rüstkosten.

- Lagerfaktor

Eine Erhöhung des Lagerfaktors führt zum Anstieg der Bestandskosten von Material, Maschinen sowie Personal und damit auch zu höheren Bestandskosten lifetime.

Um weitere Rückschlüsse über die Änderungen und Auswirkungen von Einflussparametern ziehen zu können, ist die Bewertung der möglichen Intensität einer Änderung jedes einzelnen Parameters notwendig. Eine definitive obere bzw. untere Grenze der Parameter im besten oder schlechtesten Fall vorherzusagen, ist aufgrund der Komplexität eines Unternehmens mit seinem Produktionssystem, dessen Umwelt, den eingesetzten Maschinen und Personen sowie der herzustellenden Produkte nicht möglich. Hierzu kann aber Tabelle 4-11 eine Hilfestellung bieten, den Wertebereich von Einflussparametern abzuschätzen.

Nr.	Änderungsbereich Einflussparameter	Begründung
1	Teilebedarf lifetime von -25% bis 25%	Marktuntersuchungen zeigen, dass die Produktnachfrage erheblich schwanken kann [LM08]. Nach einer McKinsey-Studie aus 2009, waren in der Automobilindustrie im Zeitraum von 1991 bis 2007 kurzfristige Jahresschwankungen von $\pm 25\%$ möglich [NKW10].
2	Produktlebenszeit von -5% bis 0%	Die Produktlebenszeit wird zunehmend kürzer und ist in der Regel von Automobilherstellern definiert. Je nach Absatzmenge kann es zu einem vorzeitigen Ende der Produktion kommen (wenn noch genügend Bestände vorhanden sind).
3	Materialeinsatz von -2% bis 2%	Die Ausarbeitung des notwendigen Materialeinsatzes sollte in der Angebotsphase sorgfältig ermittelt werden.
4	Maschinenstundensatz von -5% bis 5%	Bezogen auf den Anschaffungswert sollten die Kosten für Maschinen und Peripherie auf Angebote von Lieferanten beruhen. Die Kosten für den laufenden Betrieb müssen aufgrund von vergleichbaren Fertigungssystemen abgeschätzt werden.
5	Personalstundensatz von -2% bis 2%	Die Personalstundensätze sind regional unterschiedlich (vgl. Kapitel 4.3.3). Ist ein Produktionsstandort ausgewählt, stehen dem Unternehmen auch die Personalstundensätze zur Verfügung.
6	Zykluszeit von -2% bis 2%	Die erwarteten Zykluszeiten sollten in der Angebotsphase möglichst genau abgeschätzt werden.
7	Rüstzeit von -20% bis 20%	Das präventive Abschätzen der Rüstzeit ist u.a. von der Auslegung der Maschinen und Werkzeugen, der Komplexität der Produkte und der Fertigungsprozesse sowie dem Maschinenbediener abhängig.
8	Verfügbarkeits-Faktor von 85% bis 95%	Die Faktoren der Verluste von Verfügbarkeit, Leistung und Qualität sind hier als absolute Werte angegeben. Ein Prozess ohne Verluste würde einem Faktor mit 100% gleichkommen. Die ausgewählten Wertebereiche entsprechen den typischen Zuständen von Fertigungsprozessen von Unternehmen, bei denen Effektivitäts-Studien durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 4.1).
9	Leistungs-Faktor von 85% bis 95%	
10	Qualitäts-Faktor von 95% bis 99%	

11	Qualitätsverlust Rüsten von -20% bis 20%	Das präventive Abschätzen der Qualitätsverluste Rüsten ist u.a. von der Auslegung der Maschinen und Werkzeugen, der Komplexität der Produkte und dem Maschinenbediener abhängig.
12	Losgröße von -20% bis 20%	Ist die Losgröße erstmal definiert, so kann es durch äußere Einflüsse vom gesamten Produktionsprogramm eines Unternehmens zu Über- oder Unterschreitung der Losgröße kommen.
13	Bestandsmenge von -50% bis 20%	Je nach Stabilität von Produktionsprozessen, Mindestabnahmemengen und Wiederbeschaffungszeiten oder Wahl der Losgröße kann die Bestandsmenge variieren. Es ist beispielsweise auch ein Verzicht des Sicherheitsbestandes möglich.
14	Grund-Werkzeug von -5% bis 5%	Mit der Detaillierung vom Produktdesign der Produktzwischenstufen und des Werkzeugaufbaus, kann es zu geringen abweichenden Aufwendungen gegenüber der Grobauslegung bei der Angebotsphase kommen.
15	Lebensdauer Werkzeuge von -10% bis 10%	Die Lebensdauer sollte auf Erfahrungswerten von ähnlichen Werkzeugkonzepten und eingesetzten Werkstoffen abgeschätzt werden.
16	Zinsen bzw. Zinsfaktor von -2% bis 2%	Zur Ausarbeitung ist die Verwendung von aktuellen Zinskonditionen erforderlich. Es ist empfehlenswert, das Angebot mit einer zeitlich begrenzten Gültigkeit auszustellen.
17	Lagerfaktor von -5% bis 4%	Anstatt des gemittelten Lagerfaktors von zusätzlich 25% vom Wert des Produktzustandes (siehe Kapitel 4.3.6), sind in der metallverarbeitenden Industrie auch Werte zwischen 19% bis 30% möglich [Mar09].
18	Rohstoffpreise von -2% bis 2%	Die Preise von Rohstoffen sind von Börsenkursen abhängig und sollten im Angebot an deren Schwankungen gekoppelt werden. Je nach Rohstoffanbieter und Abnahmemengen kann es zu Preisunterschieden kommen.

Tabelle 4-11: Möglicher Wertebereich von Einflussfaktoren

Das Fallbeispiel wird benutzt, um die Ausprägungen von geänderten Einflussparametern an einer konkreten Konstellation eines Fertigungskonzeptes darzustellen. Es werden nacheinander die einzelnen Einflussparameter in gleichem Maße um die Ober- und Untergrenze nach Tabelle 4-11 erhöht bzw. verringert. Die jeweiligen Ergebnisse der prozentualen Änderungen der Kosten des Fertigungskonzeptes sind in Abbildung 4-31 dargestellt (Datenbasis siehe Anhang Tabelle 10-1 und Tabelle 10-2). Die unveränderte Ausgangssituation ist ebenfalls in dem Diagramm enthalten. Die größten Auswirkungen zeigt die Änderung des Teilebedarfs lifetime. Dieser ist vom Hersteller selber nicht beeinflussbar und abhängig vom Auftraggeber. Schlussendlich werden die Absatzmengen des Endproduktes entscheidend für den Teilebedarf lifetime sein. Damit enthält der Einflussparameter auch eine große Ungewissheit aufgrund vom unbekannten Marktverhalten des Endkunden.

Nur die Erhöhung der Verlust-Faktoren (dies entspricht einer Verringerung der Verluste) führt zu einer Einsparung der Kosten des Fertigungskonzeptes, wobei mittels des Verlust-Faktors Qualität

die größten Ersparnisse möglich sind (die Reduzierung der Ausschussteile führt zu einem niedrigeren Materialbedarf). Verluste gänzlich zu vermeiden ist zwar ein Ziel der Toyota-Philosophie, in der praktischen Umsetzung ist dieser Zustand aber unerreicht.

Einflussparameter zur Ausgangssituation verändert

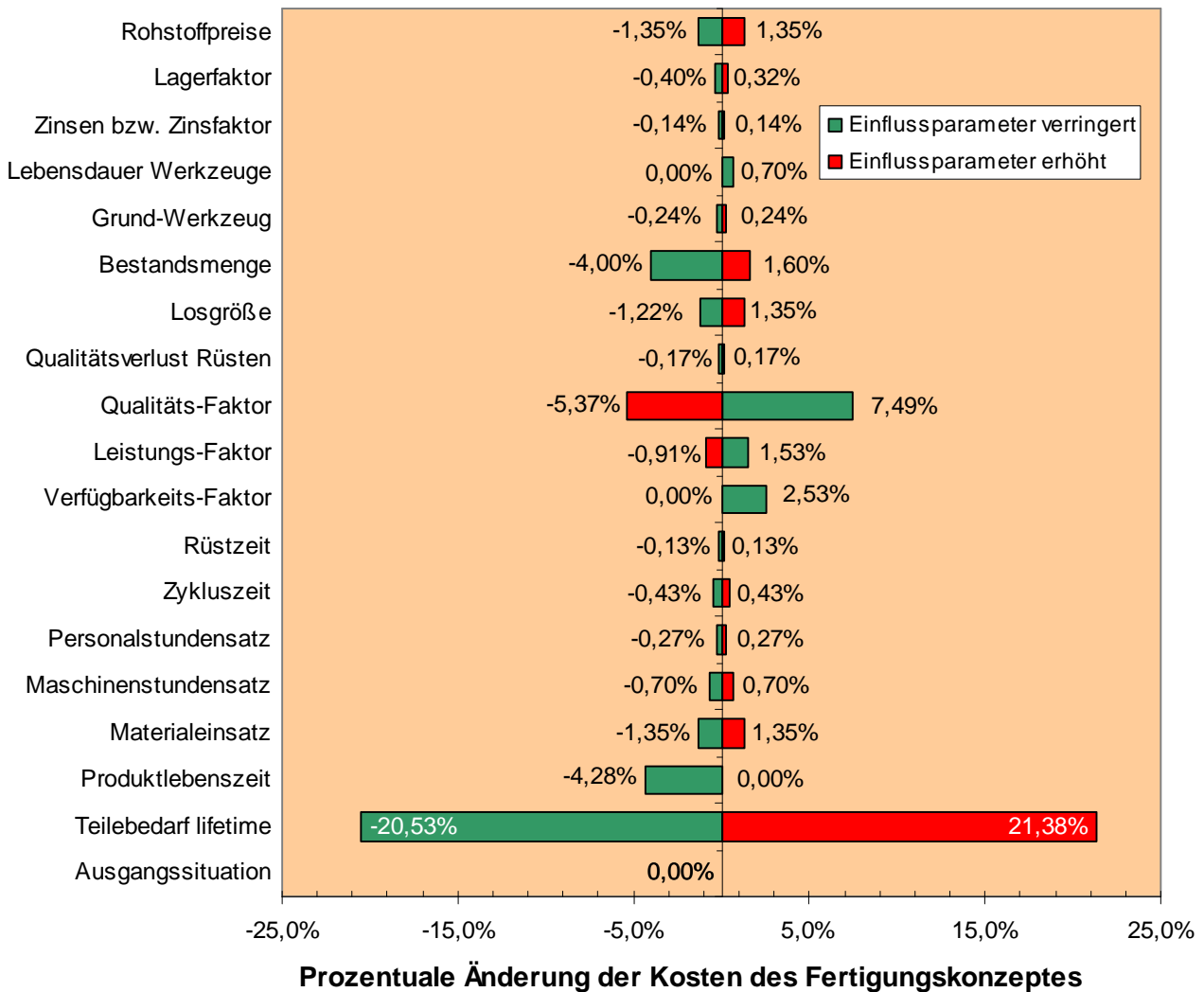


Abbildung 4-31: Auswirkungen von geänderten Einflussparametern aus Tabelle 4-11 auf die Kosten des Fertigungskonzeptes des Fallbeispiels

5 Fertigungsszenarien

5.1 Optimieren der Losgröße

Eine Änderung der Losgröße lässt die Rüst- und Bestandskosten entgegengesetzt verlaufen (siehe auch Tabelle 4-10). Abbildung 5-1 zeigt diesen gegenläufigen Trend am Fallbeispiel auf. Begonnen wurde bzw. wird im Modell mit einer Losgröße von 200.000 Teilen, die über die gesamte Produktlebenszeit 84 Rüstvorgänge erfordern. Wird die Losgröße reduziert, so steigen die Rüstkosten aufgrund der steigenden Anzahl an Rüstvorgängen. Dafür senken sich die Bestandskosten mit abnehmender Losgröße (siehe auch Tabelle 5-1).

Das Kostenoptimum liegt bei einer Losgröße von 80.000 Teilen. Dadurch müssen an jedem Fertigungssystem 210 Rüstvorgänge über den gesamten Produktlebenszyklus vorgenommen werden. In Summe entstehen somit nur noch 492.720 Euro an Rüst- und Bestandskosten. Mit der Losgröße von 200.000 Teilen waren es 670.193 Euro. Die Kosten für das Fertigungskonzept sinken durch die Optimierung der Losgröße um 177.473 Euro.

Losgröße	20.000	40.000	60.000	80.000	100.000	120.000	140.000	160.000	180.000	200.000
Anzahl Rüstvorgänge lifetime	840	420	280	210	168	140	120	105	93	84
Rüstkosten [Euro]	1.069.727	534.864	356.576	267.432	213.945	178.288	152.818	133.716	118.859	106.973
Bestandskosten [Euro]	56.322	112.644	168.966	225.288	281.610	337.932	394.254	450.576	506.898	563.220
Summe [Euro]	1.126.049	647.508	525.542	492.720	495.556	516.220	547.072	584.292	625.757	670.193
				Minimum						

Tabelle 5-1: Berechnungsergebnisse der Rüst- und Bestandskosten bei geänderter Losgröße

Diese Einsparung entsteht lediglich durch eine Anpassung der Auftragsmenge einer Losgrößenproduktion und nicht durch eine technische Erweiterung. Mit der optimierten Losgröße reduzieren sich die Kosten für das Fertigungskonzept von 7.033.404 Euro auf 6.855.931 Euro.

Kosten in Tausend Euro

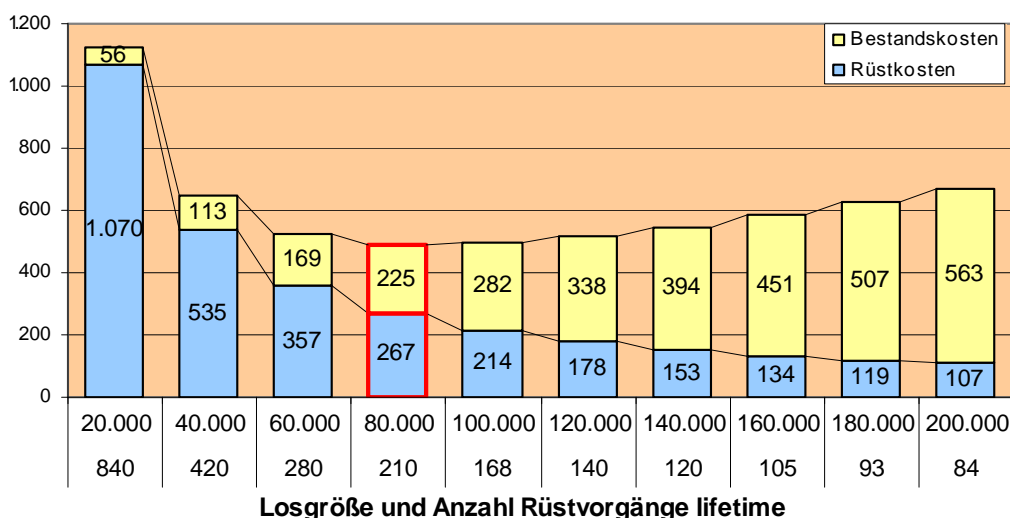


Abbildung 5-1: Optimierung der Losgröße am Fallbeispiel

Die errechnete optimale Losgröße sollte mit den in der Praxis vorliegenden Gegebenheiten reflektiert werden. Wartungszyklen von Fertigungssystemen oder Teile davon (Maschinen, Peripherie, Werkzeuge, etc.) müssen mit der Losgröße in Einklang stehen, um zusätzlichen Produktionsunterbrechungen vorzubeugen. Auch die Mitbeachtung der Kapazitäten von Fertigungssystemen spielt hier eine wichtige Rolle, vor allem bei mehrfach belegten Systemen mit einer hohen Flexibilität und Produktvielfalt. Jeder Rüstvorgang bindet eine mögliche freie Produktionszeit.

5.2 Technische Erweiterungen von Fertigungssystemen

Materialverschwendungen sind ein entscheidender Einflussfaktor bei der technischen Gestaltung von Fertigungssystemen. Um noch möglichst viel Kostenpotential aus dem Fertigungskonzept herausarbeiten zu können, lohnt sich die Betrachtung des Fertigungssystems beim Spritzgießen. Der Q-Faktor von 95% soll durch eine Erweiterung von technischen Maßnahmen am Fertigungssystem auf 99% verbessert werden (z.B. durch ein integriertes Kamerasystem zur produktionsbegleitenden Qualitätsüberwachung von Produktoberfläche und -geometrie). Diese technische Erweiterung entspricht einem Anschaffungswert von 50.000 Euro.

Ein kritischer Modellbetrachter fordert zeitgleich eine Verschlechterung des Verlust-Faktors Verfügbarkeit von 95% auf 90% und des Verlust-Faktors Leistung von 90% auf 85%, weil jetzt mehr Stillstände des Fertigungssystems erwartet werden.

Tabelle 5-2 zeigt den Vergleich der Ausgangssituation und dem Zustand nach der technischen Erweiterung. Der NEE des Fertigungssystems reduziert sich bei dem erweiterten System von 81,23% auf 75,74%. Dadurch erhöhen sich die Maschinenlaufzeit und folglich auch die Personalkosten. Die jährlichen Maschinenkosten steigen vorrangig durch den höheren Anschaffungswert und tragen trotz der längeren Maschinenlaufzeit zu einem Anstieg des Maschinenstundensatzes bei. Dafür können durch die Verringerung der Qualitätsverluste die Bedarfe an Rohmaterial für Metall, Kunststoff und Edelmetall gesenkt werden. Durch Anwendung des Modells wird ermittelt, dass diese technische Erweiterung dennoch seine wirtschaftliche Berechtigung hat. Obwohl eine längere Maschinenlaufzeit, höhere Maschinen- und Personalkosten sowie eine Verschlechterung des NEE vorliegen, sinken die Kosten für das Fertigungskonzept um ca. 39.000 Euro auf 6.817.000 Euro (siehe Abbildung 5-2). Das liegt maßgeblich an den gesunkenen Materialkosten des gestiegenen Qualitäts-Faktors. Die technische Erweiterung des Systems sollte vorgenommen werden.

Dieses Beispiel zeigt die Wichtigkeit, eine ganzheitliche Bewertung von Fertigungskonzepten vornehmen zu müssen, damit die richtigen Rückschlüsse auf Modifikationen von Systemen gezogen werden können.

Effektivitätsbewertung	Einheit	FS 4	FS 4	Differenz
		Ausgangssituation	nach Optimierung	
		Spritzgießen	Spritzgießen	
Verlustfaktor Verfügbarkeit	[%]	95,00	90,00	-5,00
Verlustfaktor Leistung	[%]	90,00	85,00	-5,00
Verlustfaktor Qualität	[%]	95,00	99,00	4,00
Net Equipment Effectiveness	[%]	81,23	75,74	-5,49

Basisdaten Fertigungssystem

Anschaffungswert	[Euro]	200.000	250.000	50.000
Wiederbeschaffungswert (WBW)	[Euro]	217.389	271.737	54.347
Produktlebenszeit	[Jahre]	7	7	0
Energieverbrauch inkl. Peripherie	[kWh]	20	21	1
Stromkosten	[Euro/kWh]	0,1	0,1	0
Faktor Instandhaltung und Wartung vom WBW	[%]	3	3	0
Platzbedarf	[qm]	40	44	4
Raummiete (jährlich)	[Euro/qm]	96	96	0
Betriebsstoffe	[Euro/h]	0,5	0,5	0
Zinssatz	[%]	10	10	0

Jährliche Maschinenkosten

Kalkulatorische Abschreibung	[Euro/Jahr]	31.055,62	38.819,52	7.763,90
Kalkulatorische Zinsen	[Euro/Jahr]	10.000,00	12.500,00	2.500,00
Energiekosten	[Euro/Jahr]	6.321,36	7.074,73	753,37
Kosten für Instandhaltung und Wartung	[Euro/Jahr]	6.521,68	8.152,10	1.630,42
Raumkosten	[Euro/Jahr]	3.840,00	4.224,00	384,00
Betriebsstoffkosten	[Euro/Jahr]	1.580,34	1.684,46	104,12
Summe Maschinenkosten	[Euro/Jahr]	59.318,99	72.454,81	13.135,81

Jährliche Maschinenlaufzeiten

Maschinenlaufzeit durch Produkt	[h/Jahr]	2872,68	3080,92	208,24
Maschinenlaufzeit durch andere Produkte	[h/Jahr]	288,00	288,00	0,00
Summe Maschinenlaufzeit	[h/Jahr]	3160,68	3368,92	208,24

Maschinenstundensatz

Maschinenstundensatz	[Euro/h]	18,77	21,51	2,74
----------------------	----------	--------------	--------------	-------------

Zusätzlicher Teilebedarf durch Q-Faktor bei einem Kundenbedarf von 16,8 Mio. Teilen

Metall	[Teile]	884.211	169.697	-714.514
Kunststoff	[Teile]	884.211	169.697	-714.514
Edelmetall	[Teile]	884.211	169.697	-714.514

Tabelle 5-2: Vergleich der Ausgangssituation vor und nach der Optimierung

Bei technischen Erweiterungen von Fertigungssystemen stellt sich die Frage nach den Kosten für den Einsatz von Technik. Heutzutage gibt es viele Möglichkeiten, Automatisierungsmaßnahmen oder qualitätsüberwachende Prüfsysteme bzw. Verpackungssysteme in die Prozesskette zu integrieren. Wichtig sind aus Produktsicht angemessene Investitionen in Fertigungssysteme, um die Verschwendung (bzw. Ausgaben) nicht noch weiter zu erhöhen.

Kostenänderung der Ausgangssituation zur technischen Erweiterung [Tausend Euro]

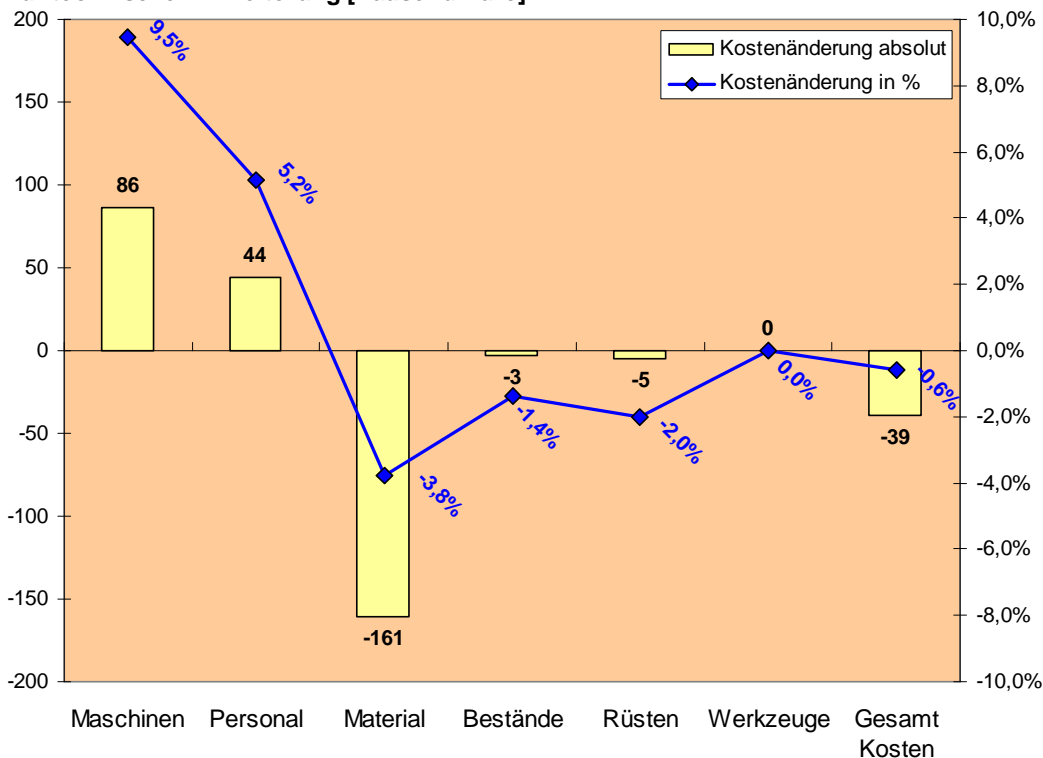


Abbildung 5-2: Kostenänderung im Fertigungskonzept durch die technische Erweiterung

5.3 Vergleich von Fertigungskonzepten

Bislang wurde das Fallbeispiel analysiert und optimiert. Ob sich dieses Fertigungskonzept mittels Reel-to-Reel auch im Vergleich mit anderen Konzepten als die günstigste wirtschaftliche Variante erweist, soll jetzt untersucht werden.

Die Gegenüberstellung wird an zwei ausgewählten alternativen Fertigungssystemen (Reel-to-Line und WT-Umlauf System) durchgeführt.

Als erstes werden die beiden Stanzautomaten und die Spritzgießmaschine über Pufferschlaufen miteinander verknüpft, so dass ein Reel-to-Line System entsteht. Die einzelnen Systeme können jetzt nicht mehr autark voneinander produzieren, sondern sind voneinander abhängig. Allerdings muss der Stanzgitterstreifen jetzt nur noch beginnend zum Biegeprozess über eine Haspel abgewickelt werden und durchläuft das Biegen, Spritzgießen und Austrennen ohne weitere Aufwickelvorgänge. Die übrigen Haspeln der Reel-to-Reel Systeme sind nicht mehr notwendig und in Summe reduziert sich damit der Anschaffungspreis des Reel-to-Line Systems. Die Werkzeuge des Reel-to-Reel Systems können gleichermaßen in das Reel-to-Line System eingesetzt werden. Durch die verkettete Produktion entstehen für die Stanzautomaten Wartezeiten bzw. langsamere Produktionsgeschwindigkeiten. Die Zykluszeit für das Reel-to-Line System wird vom Spritzgießprozess vorgegeben. Bei Störungen in der Fertigung gibt es zeitliche Vorteile mit der Linienfertigung bzgl. der Verifizierung von eingesetzten Maßnahmen und der Behebung von

Prozess- und Qualitätsproblemen, was eine Neubewertung der Verlustfaktoren erforderlich macht. Die Verlustfaktoren Verfügbarkeit und Leistung werden mit 85% und der Faktor Qualität mit 95% bewertet. Es wird davon ausgegangen, dass die Produktqualität aus Kombination von Werkzeug, Maschine, Peripherie und Mensch sich nur geringfügig ändert, unabhängig davon, ob diese autark oder verkettet produzieren.

Als zweite Alternative wird ein speziell für dieses Produkt konzipiertes WT-Umlaufsystem inkl. Prüfsystem genutzt. Beginnend wird das Stanzgitter mit einer Abhaspel abgewickelt und durch einen Biege-Austrennprozess zu losen, einzelnen Leiterbahnen gestanzt. Diese werden über eine Handlingseinrichtung in die Werkstückträger eingelegt und auf eine erfolgreiche Einlegeposition hin überprüft. Fehlerhaft bestückte Werkstückträger werden aus dem Prozess ausgeschleust, ohne eine Produktionsunterbrechung der Anlage zu verursachen. Die Umspritzung erfolgt, ebenso wie bei den anderen Fertigungssystemen, in einem Spritzgießwerkzeug mit vier Kavitäten. Die Produktgeometrie und das Werkzeugkonzept erlauben es, einen Teil der Kühlzeit in die Umlaufstrecke zu verlagern, was die Zykluszeit gegenüber den anderen Konzepten von 3,5 auf 3,2 Sekunden pro Teil reduziert. Für das Spritzgießwerkzeug werden sieben Werkstückträger benötigt, um die Vorteile der kürzeren Zykluszeit auch nutzen zu können. Nach der Entformung wird das Teil mittels einer weiteren Handlingseinrichtung an ein Prüfsystem übergeben. In diesem finden Prüfungen an Geometrie und Oberfläche statt. Die Verfügbarkeits- und Leistungsfaktoren werden mit 85% und der Qualitätsfaktor mit 98% bewertet.

Tabelle 5-3 zeigt die Gegenüberstellung der abgeschätzten und ermittelten Parameter der Fertigungskonzepte. Die theoretischen Basisdaten zur Berechnung der Maschinenstundensätze sind im Anhang in Tabelle 10-4 zu finden.

	Reel-to-Reel			Reel-to-Line	WT-Umlauf
	Stanzen (Biegen)	Spritzgießen (4-fach)	Stanzen (Austrennen)		
Anschaffungswert [€]	220.000	250.000	220.000	650.000	750.000
Maschinenstundensatz [€/h]	27,00	21,51	40,00	50,88	68,05
Personalstundensatz [€/h]	30,1	30,1	30,1	32,1	32,1
Zykluszeit [s]	0,6	3,5	0,2	3,5	3,2
Rüstzeit [h]	3	3	3	9	9
Verfügbarkeitsfaktor [%]	95	90	95	85	85
Leistungsfaktor [%]	90	85	97	85	85
Qualitätsfaktor [%]	98	99	98	95	98
NEE [%]	84	76	90	69	71
Effektive Zykluszeit [s]	0,72	4,62	0,22	5,10	4,52
Qualitätsverlust Rüsten [Teile]	100	100	100	300	300
Grund-Werkzeug Biegen [€]	40.000	-	-	40.000	40.000
Lebensdauer [Teile]	30 Mio.	-	-	30 Mio.	30 Mio.
Grund-Werkzeug Spritzgießen [€]	-	80.000	-	80.000	200.000
Lebensdauer [Teile]	-	6 Mio.	-	6 Mio.	14 Mio.
Grund-Werkzeug Austrennen [€]	-	-	25.000	25.000	-
Lebensdauer [Teile]	-	-	10 Mio.	10 Mio.	-
Optimale Losgröße	80.000	80.000	80.000	100.000	100.000
Anzahl Rüstvorgänge	210	210	210	168	168
Ø Umlaufbestand	40.000	40.000	40.000	50.000	50.000
Sicherheitsbestand	0	80.000	40.000	100.000	100.000

Tabelle 5-3: Gegenüberstellung der wichtigsten Parameter der unterschiedlichen Fertigungskonzepte

Beide Alternativen beinhalten verkettete Maschinen bzw. Werkzeuge mit den Technologien Stanzen sowie Spritzgießen und werden von einer Person bedient. Daher ist für das Personal eine erweiterte Kompetenz notwendig. Diese wird in Form eines höheren Personalstundensatzes von zwei Euro pro Stunde zusätzlich honoriert.

Die Anfahrteile beim Rüstvorgang bleiben bei 100 Teilen je Werkzeug. Das WT-Umlaufsystem besitzt zwar ein Stanz-Werkzeug weniger, dafür aber mehrere Werkstückträger und Handlings-einrichtungen, welche auch beim Rüstvorgang eingestellt werden müssen.

Die Bestandsmengen der verketteten Fertigungsalternativen verringern sich durch die Reduzierung der Lagerorte und erzielen mit einer Losgröße von 100.000 Teilen die geringsten Kosten für Rüsten und Bestand.

Mit der Anwendung des Modells ist das Ergebnis des Kostenvergleichs der Fertigungskonzepte in Abbildung 5-3 zu finden (Datenbasis siehe Anhang Tabelle 10-5). Die Darstellung bezieht sich auf den gesamten Produktlebenszyklus aller Fertigungssysteme. Als Basis dient das optimierte Fallbeispiel und die anderen Konzepte zeigen ihre Abweichung zur Basis auf.

Die Maschinenkosten sind bei beiden Alternativen höher als bei der Ausgangssituation. Beim Reel-to-Reel Konzept haben die Stanzautomaten vor und nach der Spritzgießmaschine sehr kurze Zykluszeiten im Verhältnis zum optimierten Fallbeispiel. Zum einen entstehen damit eine höhere Flexibilität des autarken Systems und freie Fertigungskapazitäten für die Herstellung anderer Produkte. Zum anderen fällt für das Produkt durch die kurzen Maschinenlaufzeiten ein vergleichsweise geringer Anteil an Maschinenkosten an (vgl. auch Abbildung 4-10). Durch die Kopplung der autarken Fertigungssysteme zu Reel-to-Line senken die Biege- und Austrennverluste nun zusätzlich die Effektivität des Spritzgießprozesses.

Kostenabweichung von der Ausgangssituation [Tausend Euro]

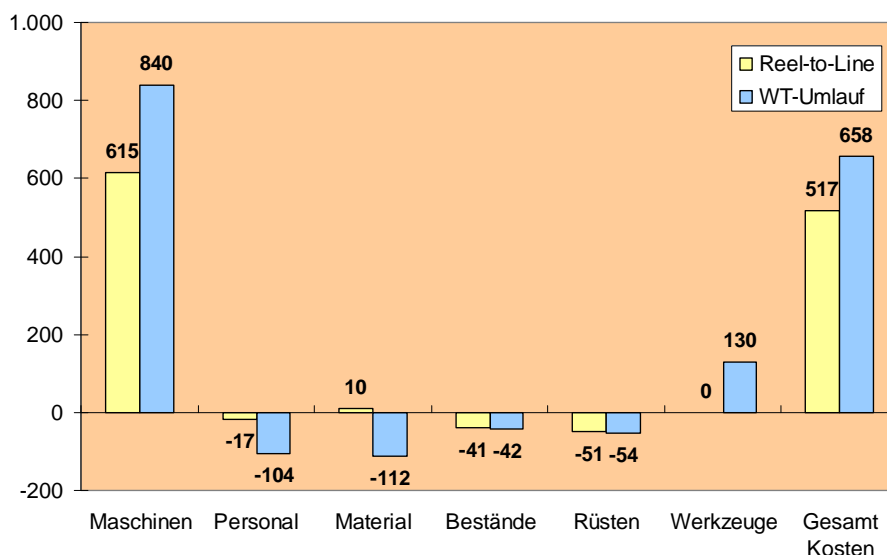


Abbildung 5-3: Kostenabweichung der alternativen Konzepte zur Ausgangssituation

Die kürzeste effektive Zykluszeit hat das WT-Umlaufsystem und besitzt, trotz des erhöhten Personalstundensatzes, die niedrigsten Personalkosten lifetime.

Mit den geringsten Qualitätsverlusten erzielt das WT-Umlaufsystem zusätzlich die wenigsten Materialkosten lifetime.

Durch die verkettete Produktion entstehen keine lagerbedürftigen Zwischenprodukte mehr. Die Summe der Bestandsmengen senkt sich und folglich sinken auch die Bestandskosten. Mit den gesunkenen Bestandskosten und der Neuberechnung der optimalen Losgröße können die Anzahl der Rüstvorgänge sowie die Rüstkosten reduziert werden.

Die Werkzeugkosten im Verhältnis vom Reel-to-Reel zum Reel-to-Line System sind unverändert. Das WT-Umlaufsystem besitzt sieben Unterteile und verursacht somit bei diesem Teilebedarf lifetime von 16,8 Mio. Teilen die höchsten Werkzeugkosten.

In der Gesamtheit betrachtet, konnten in dieser kundenspezifischen Konstellation mit keinem der beiden alternativen Konzepte niedrigere Kosten erzielt werden als beim optimierten Fallbeispiel. Dieses ist in der Gegenüberstellung das günstigste Fertigungskonzept für das betrachtete Produkt. Dieser beschriebene Vergleich mit detaillierten Daten bewertet und gewichtet im Ergebnis die Fertigungskonzepte. Um bereits im Vorfeld eine grobe Abschätzung für die Ausarbeitung von Fertigungskonzepten zu haben, kann Abbildung 5-4 herangezogen werden. Sie dient zwar lediglich zur allgemeinen Orientierung, aber kategorisiert die unterschiedlichen Standardkonzepte anschaulich. Es gibt die Kategorien Maschineninvestitionen, Stückzahl, Durchlaufzeit und Flexibilität bzgl. der Produktvielfalt.

Zu Beginn der Planung eines Fertigungskonzeptes ist die Frage zu stellen, ob das Produkt als Einzelteil oder als Stanzgitter umspritzt werden kann. Einzelteile sind nur vom WT-Wechseltisch und dem WT-Umlaufsystem herstellbar. Dann entscheidet die Stückzahl über die weitere Vorgehensweise. Für den Fall einer mittleren Stückzahl kann oftmals der WT-Wechseltisch durch geringe technische Maßnahmen erweitert werden, so dass der Automatisierungsgrad steigt.

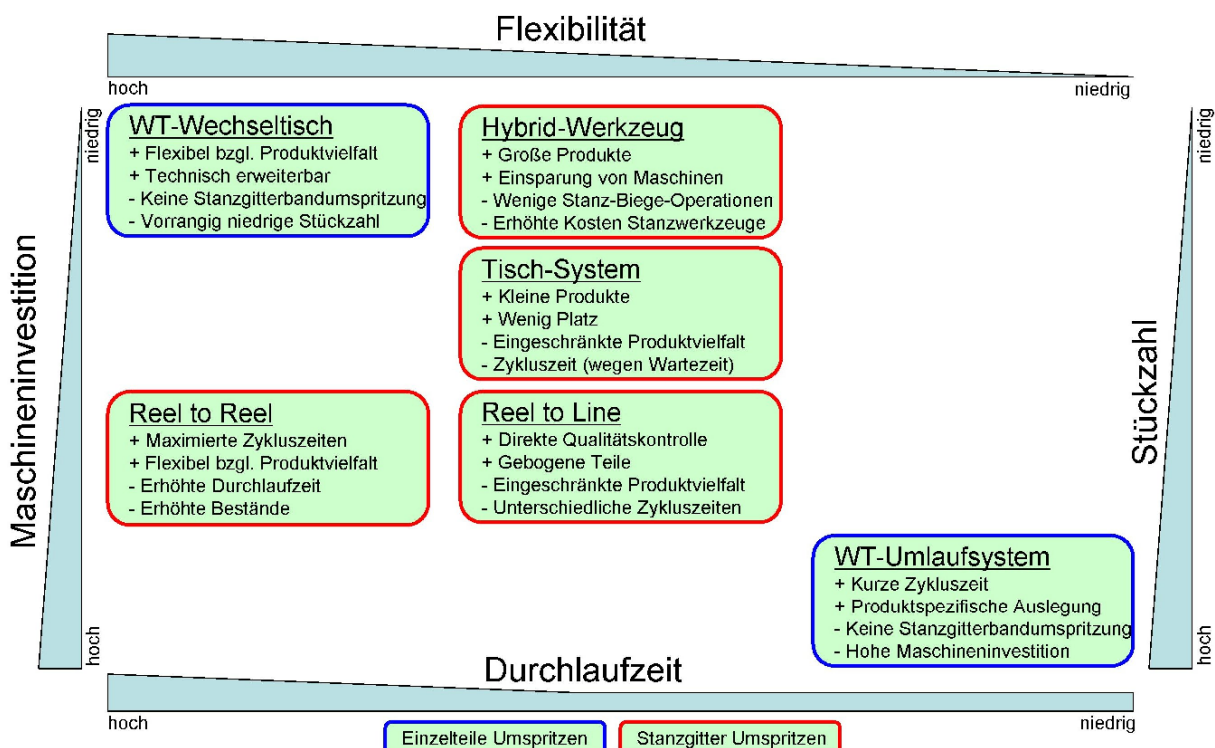


Abbildung 5-4: Schema für die Vorauswahl von Fertigungskonzepten

Ist das Spritzgießen an einem Stanzgitter möglich, so ist das Reel-to-Reel Konzept als erstes weiter zu hinterfragen. Die maximalen Produktionsgeschwindigkeiten je Fertigungssystem und die große Produktvielfalt sind für viele Stückzahlbereiche interessant. Das zeigt auch die Möglichkeit der Mehrfachbelegung durch andere Produkte. Die erhöhte Durchlaufzeit, ausgelöst durch die separaten Fertigungsschritte, wird in diesem Schaubild nicht allzu schwer gewichtet.

Bringt die Geometrie des Endproduktes oder des Zwischenproduktes ein Risiko für Deformationen beim Auf- und Abspulen auf ein Coil, so ist dies kritisch zu betrachten. Die verketteten Fertigungskonzepte haben hier ihren Vorteil und können Produkte herstellen, wozu das Reel-to-Reel Konzept nicht in der Lage ist. Durch den Wegfall von autarken Fertigungsstufen sinkt die Durchlaufzeit. Alle verketteten Systeme bieten den Vorzug der zeitnahen Qualitätskontrolle durch mehrere Fertigungsstufen. Im Gegensatz dazu sinkt aber die Flexibilität der verketteten Konzepte, da das mögliche Produktspektrum mit zunehmenden Randbedingungen (wie z.B. geeignete Maschinengrößen, festgelegte Prozessabfolgen, etc.) sich verkleinert. Es kann eine Strategie sein, die Maschinen etwas größer zu dimensionieren, damit das Produktspektrum sich vergrößert. Dabei erhöhen sich aber in der Regel auch die Maschineninvestitionen und schlussendlich die Maschinenkosten.

Die Differenzierung der verketteten Systeme für das Umspritzen von Stanzgittern nach der Produktgröße ist relativ einfach gehalten. Das Tisch-System benötigt selber wenig Platz und ist für kleine Produkte vorteilhaft. Das Hybrid-Werkzeug spart vor- und nachgelagerte Stanzautomaten ein und bietet sich vorrangig für große Produkte mit wenigen Stanz-Biege-Operationen an. Interessant wird es, wenn sich die effektive Zykluszeit pro Teil des Reel-to-Line Konzeptes zum Hybrid-Werkzeug oder zum Tisch-System ähnelt. Dann sind die Maschinenkosten vom Hybrid-Werkzeug und des Tisch-Systems aufgrund ihrer günstigeren Anschaffungswerte attraktiv.

Spätestens beim Erreichen der Kapazitätsgrenze eines Reel-to-Line Konzeptes steigen die Argumente für ein WT-Umlaufsystem. Durch die kürzeste Zykluszeit aller Systeme kann auch die größte Teilemenge produziert werden. Es sind zwar spezielle technische Maßnahmen zu treffen, damit die Teile aus den Stanzgittern zum Einzelteil vereinzelt werden. Dies ist jedoch im Allgemeinen günstiger, als eine komplette zweite Reel-to-Line Fertigungslinie inkl. doppelte Werkzeugsätze anfertigen zu lassen.

6 Kritische Reflektierung

6.1 Fertigungskonzepte nach der Toyota-Philosophie

In wie weit überdecken sich die Ziele der Toyota-Produktionssysteme (TPS) und deren Philosophie mit den vorgestellten Fertigungstechnologien und -konzepten?

Die Hauptziele vom TPS sind

- höchste Qualität erreichen
- bei niedrigsten Kosten und
- kurzen Durchlaufzeiten

und werden vorrangig durch

- die Vermeidung jeglicher Verschwendung und unterstützt von
- dem Null-Fehler-Prinzip,
- einem kontinuierlichen Materialfluss und
- harmonisierten Zykluszeiten

erzielt [Her10].

Die Verschwendungen wurden bereits in den vorangegangenen Kapiteln erläutert und in die Modellbetrachtung mit einbezogen. Keins der dargestellten Fertigungskonzepte ist in der Lage Verschwendungen komplett zu eliminieren. Jedes Konzept besitzt Bestände und Qualitätsverluste oder muss mit Wartezeiten rechnen. Auch bleibt kein Fertigungssystem von einem Ausfall verschont und ist immer zu 100% zuverlässig einsatzbereit. Die Vermeidung jeglicher Verschwendung wird wohl eine unerreichbare Vision bzw. eine Unternehmensphilosophie zur ständigen Verbesserung bleiben.

Um dennoch diesem hohen Ziel näher zu kommen, gibt es das Fluss-Prinzip der one-piece-flow Strategie durch welche ein kontinuierlicher Materialfluss sowie eine Harmonisierung der Zykluszeiten abgebildet wird [RW11]. Dabei sollen Fertigungslose aufgelöst werden und die Teile einzeln von einem Fertigungssystem direkt nach der Bearbeitung in das nächste eingehen [Klu10]. Das ideale one-piece-flow ist eine Produktion genau im Kundentakt. Es erhöht maßgeblich die Produktivität und die Qualität, weil Fehler in der Produktion direkt erkannt werden können und keine Puffer mehr zur Kompensation von Engpässen vorhanden sind. Es muss dann direkt das Problem behoben werden. Folglich können bei Prozessbeherrschung die Bestände gesenkt werden, was wiederum die Durchlaufzeit reduziert und Platz einspart [Lik04].

One-piece-flow bewirkt eine Verringerung der Losgröße bis zu einem Teil. Das ermöglicht häufige Produktwechsel [BCG10]. Bedingung hierfür sind drastische Verkürzungen der Rüstzeiten.

Hierzu entwickelte Shingo bei Toyota die Methode von Single Minute Exchange of Die (SMED), welche den Anspruch hat, die Rüstzeiten auf ein absolutes Minimum zu reduzieren. Ziel von SMED sind Rüstzeiten unter zehn Minuten für jeden Umrüstvorgang [Har07]. Erzielt werden diese Reduktionen, indem möglichst viele Vorbereitungen schon während der Maschinenlaufzeit vorgenommen werden [DHL09].

Noch sind in der Praxis sehr viele Unternehmen von solch kurzen Rüstzeiten und häufigen Produktwechseln für alle Fertigungssysteme (Stanzen, Galvanisieren und Spritzgießen) weit entfernt. Vermutlich werden die Potentiale unterschätzt bzw. sind gar nicht bekannt. Mit einer Losgröße von eins ist es im klassischen Sinn einfacher, sich einen Zusammenbau in Form einer Montage vorzustellen als z.B. ein einziges Teil zu galvanisieren oder nur ein Teil zu stanzen bzw. zu spritzgießen.

Das Thema one-piece-flow soll also eine Produktion im Kundentakt darstellen, gleichzeitig aber auch mittels kurzen Rüstzeiten häufige Produktwechsel auf einem Fertigungssystem zulassen. Das sind zwei divergierende Ziele. Die Produktion müsste schon um ein Vielfaches schneller erfolgen als der Kundentakt, damit mehrere Produkte im festgelegten Zeitraum kurz hintereinander produziert werden können.

Um ein Fertigungskonzept auszuwählen, gibt es die beschriebenen Möglichkeiten von autarken und verketteten Fertigungssystemen. Das Reel-to-Reel System als separates Fertigungssystem hat den Vorteil bzgl. des Produktspektrums sehr flexibel zu sein, was häufige Produktwechsel einfacher zulässt. Dafür ist aber kein kontinuierlicher Materialfluss möglich. So entstehen die Überlegungen nach einer optimalen Losgröße, obwohl der Toyota-Gedanke die Zahl eins anstrebt. Wird ein verkettetes Fertigungssystem wie z.B. Reel-to-Line betrachtet, so entsteht durch die Verkettung ein kontinuierlicher Materialfluss mit harmonisierter Zykluszeit z.B. zwischen Stanzen und Spritzgießen. Doch die Harmonisierung verursacht Wartezeiten der Stanzautomaten. In der Literatur wird dies auch als Grenze zwischen Fließfertigung und unterschiedlichen Zykluszeiten beschrieben [Spe07]. Weiterhin sinkt bei verketteten Fertigungssystemen die Flexibilität für ein großes Produktspektrum. Für beide Kategorien an Fertigungssystemen gibt es also ungewollte Verschwendungen.

Selbst wenn ein Fertigungssystem speziell gebaut werden würde, das alle notwendigen Technologien Stanzen, Galvanisieren und Spritzgießen im kontinuierlichen Materialfluss beinhaltet, ist noch eine Frage offen: Wie ist die Harmonisierung der Zykluszeiten zu gestalten? Erfolgt die Harmonisierung zum Kundentakt, so ist das System zu 90% bis 100% ausgelastet und es benötigt keine Flexibilität mehr für ein größeres Produktspektrum. Somit gäbe es keine Rüstkosten und keine Bestandskosten mehr. Solch eine Konstellation erfordert aber eine hohe Automatisierung des Fertigungssystems, andernfalls fallen für die gesamte kontinuierliche Maschinenlaufzeit auch dauerhaft Personalkosten an. Vor allem die Zuverlässigkeiten von vielen gekoppelten Fertigungsschritten müssten sehr hoch sein. Weiterhin sollten dem System die Umweltbedingungen und die Abwasserentsorgung zum Betreiben von Galvanikanlagen zur Verfügung stehen.

Die Standpunkte zwischen der heutigen Handhabung von Losgrößen, kontinuierlichem Materialfluss und harmonisierten Zykluszeiten für Kunststoff-Metall-Bauteile in Unternehmen und dem Idealbild der Toyota Philosophie liegen ziemlich weit auseinander.

Aber im Zuge von steigendem Wettbewerb werden die Unternehmen gezwungen sein, sich zunehmend mit solchen Ansätzen und Strategien zu beschäftigen, auch wenn die vollständige

Umsetzung aller Ziele im Sinne nach Toyota für die vorgestellten Fertigungssysteme und –konzepte nicht möglich ist und somit nicht die Lösung darstellt.

Es muss daher nicht die Frage gestellt werden, wie ein Fertigungskonzept ohne Verschwendung umgesetzt werden kann, sondern welches die geringsten Gesamtkosten über die Produktlebenszeit besitzt. Nur so kann sich ein Unternehmen Wettbewerbsvorteile verschaffen. Mit Unterstützung der gesamtheitlichen Modellbetrachtung besteht die Möglichkeit, gezielte Optimierungen an Fertigungskonzepten vorzunehmen und kostenseitig zu bewerten, um Fertigungskonzepte auch ganzheitlich beurteilen zu können.

6.2 Modell

Das entwickelte Modell beinhaltet die spezielle Produktbetrachtung auf Grundlage der auftragsspezifischen Rahmenbedingungen und ermöglicht eine allgemeingültige Kostenkalkulation und Darstellungsweise von Fertigungskonzepten. Der individuelle Unternehmensblickwinkel hingegen bleibt dem Modell verschlossen. Ohne ein produzierendes Unternehmen kann keine Fertigung von Produkten stattfinden. Vor Anwendung des Modells in einem Unternehmen ist es empfehlenswert, die unternehmensspezifischen Randbedingungen, Faktoren bzw. Gegebenheiten zu überprüfen und ggfs. in die Modellvorgehensweise zu integrieren.

Im Allgemeinen handelt es sich hierbei um ein statisches Modell, welches die Annahmen und Gegebenheiten lediglich zum Zeitpunkt des Betrachtens berücksichtigen kann. Unternehmen sind ständigen Einflüssen der Umwelt ausgesetzt und müssen daher für Ihren Fortbestand einen permanenten Wandel vollziehen.

Werden im Fertigungskonzept durch das Produkt, dem Kunden oder Unternehmen die Rahmenbedingungen, Einflussfaktoren oder Basisdaten von Fertigungssystemen geändert, so sollte das gesamte Fertigungskonzept mit allen Einflussfaktoren überprüft und ggfs. angepasst werden. Damit ist es möglich, dass zu einem späteren Zeitpunkt durch eine erneute Modellanwendung eines ausgearbeiteten Fertigungskonzeptes auch ein anderes Modellergebnis entsteht.

Weiterhin muss die Kapazitätsbetrachtung von Fertigungssystemen außerhalb des Modells stattfinden und sich immer auf die aktuelle Unternehmenssituation beziehen, um auch genügend Ressourcen für den möglichen Projektauftrag zur Verfügung stellen zu können.

Die proaktive Bewertung der Verlust-Faktoren hinsichtlich der Effektivität von Fertigungssystemen erfolgt anhand des vorhandenen Fachwissens und zurückliegender Erfahrungen des Modellanwenders, was somit zu einer subjektiven Abschätzung führt. Es wird daher für die Anwendung des Modells in Unternehmen empfohlen, Kategorien für Produkte und Fertigungssysteme zu bilden, damit ein standardisierter Bewertungsprozess durchgeführt werden kann. Produkte könnten beispielsweise nach der Produktart (Vorumspritzlinge, Stecker, Gehäuse) und nach dem Anspruch der Produktqualität (Toleranzen, Funktion, Material, etc.) in Schwierigkeitsstufen (niedrig, mittel, hoch) eingeordnet werden. Zusammen mit einer Eingruppierung der geplanten Fertigungssysteme hinsichtlich der erforderlichen Prozess-toleranzen, dem beabsichtigten Einsatz von Maschinen inkl. Peripherie, dem ausgearbeiteten

Prozessdurchlauf (autark, verkettet, produktspezifisch) und den beabsichtigten Werkzeugkonzepten wäre eine Matrix mit hinterlegten Effektivitäten vorstellbar. Solch eine Matrix sollte fortlaufend nach dem Wissensstand des Herstellers aktualisiert werden, um auch neueste Erkenntnisse für zukünftige Angebote nutzen zu können.

Zur Kostenkalkulation müssen nicht zwangsweise neue Maschinen eingesetzt werden. Es ist auch möglich, bereits abgeschriebene Maschinen für die Modellanwendung zu verwenden. In der Berechnung des Maschinenstundensatzes entfallen dann die jährlichen Kosten für Abschreibungen und Zinsen.

Weiterhin führen in dem Modell neu akquirierte Aufträge zu einer Neuberechnung der Maschinenstundensätze der geplanten Fertigungssysteme.

Für Unternehmen in der Praxis wird eine kontinuierliche Anpassung der Maschinenstundensätze vermutlich unpraktikabel erscheinen. Der Maschinenstundensatz eines Fertigungssystems kann aber auch als Konstante eingesetzt werden, die in regelmäßigen Abständen auf Aktualität verifiziert wird. Dabei steigt das Risiko von Fehlkalkulationen bei den Maschinenkosten des Fertigungskonzeptes. Unter Umständen sinken die Chancen zur Auftragsgewinnung oder die tatsächlichen Maschinenkosten werden höher sein als kalkuliert.

Das Modell beinhaltet die Personalkosten für das Bedienen der Fertigungssysteme. Betriebe setzen beispielsweise eine Person auch für mehrere Fertigungssysteme gleichzeitig ein. Im Modell sollten in solch einem Fall für die Kostenkalkulation ein anteiliger Personalstundensatz und die Verlust-Faktoren für Mehrfachbedienung von Fertigungssystemen eingesetzt werden.

Außerdem fallen in einem Unternehmen zusätzliche Kosten für Personal an, wie z.B. die Kosten für den Vertrieb, die Projektierung bis zur Serienreife, die Produktbetreuung in der Serienphase, die Materialbeschaffung oder die Steuerung der Fertigungsaufträge. Diese Personalkosten müssen bei der Ausarbeitung ebenfalls abgeschätzt und ins Angebot integriert werden.

Die Materialkosten beinhalten zum einen die Kosten der verkauften Teile an den Kunden sowie zum anderen den bei der Herstellung entstehenden Prozessausschuss jeder einzelnen Fertigungsstufe und bietet damit eine umfassende vorausschauende Bewertung der erwarteten Kosten in der Serienproduktion.

Das Modell beinhaltet Prozessausschuss als einen konstanten, gleich bleibenden Wert. Im Zuge einer kontinuierlichen Verbesserung der Produktionsprozesse in der Serienphase ist zu erwarten, dass die Qualitätsverluste mit zunehmender Produktlebenszeit geringer werden. Daher sollte der Verlust-Faktor Qualität als Mittelwert der gesamten Produktlebenszeit angewendet werden.

Ergänzend ist noch das notwendige Material in der Projektierungsphase abzuschätzen. Empfehlenswert sind Erprobungen von Fertigungsprozessen und Werkzeug-Bemusterungen mit Rohmaterialien von unterschiedlichen Chargen, um bereits vor Serienbeginn die Einflüsse von Chargenschwankungen bewerten zu können. Die dabei anfallenden Materialmengen gehören zur internen Prozessvalidierung eines Unternehmens und verursachen somit weitere Kosten. Die Höhe der Kosten kann je nach Know-How und Erfahrung von ähnlichen Produkten und dem Schwierigkeitsgrad der ausgewählten Fertigungsprozesse abhängen.

Für die Berechnung der Bestandskosten wird im Modell der Lagerfaktor herangezogen. Weiterführend wäre es bei detaillierter Kenntnis von Verpackung der Zwischen- und Endprodukte möglich, den notwendigen Platzbedarf für jeden Lagerort zu errechnen. Mit den Gegebenheiten hinsichtlich der Lagerkosten pro Lagerplatz eines Unternehmens wären damit die Bestandskosten noch genauer ermittelbar.

Die Kosten für die Verpackung der Zwischen- und Endprodukte sind in den Berechnungsformeln des Modells nicht enthalten und müssen separat dem Modellergebnis hinzugefügt werden.

Im Modell ist für den Sicherheitsbestand eine standardisierte Vorgehensweise beschrieben. Die fortbestehende Notwendigkeit eines Sicherheitsbestandes sollte unternehmensspezifisch in der Serienphase erneut bewertet werden. Je nach Produktqualität sowie Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Fertigungssysteme kann eine Reduzierung des Sicherheitsbestandes möglich sein, sofern es vom Kunden keine speziellen Vorgaben gibt.

Die Abschätzung der Qualitätsverluste beim Rüsten unterliegt, ebenso wie die Verlust-Faktoren, einer subjektiven Bewertung. Auch hier ist durch eine ständige Verbesserung der Prozesse und einem kontinuierlichen Wissenstransfer eine Reduktion der Qualitätsverluste beim Rüsten wahrscheinlich.

In der Praxis führt das günstigste Fertigungskonzept aber nicht zwangsweise zum Auftrag. Die Projektierungszeit kann für die Auftragsvergabe auch eine entscheidende Rolle spielen, so dass nicht unbedingt das günstigste, sondern das am schnellsten umzusetzende Fertigungskonzept aus Sicht des Auftragsgebers wichtiger, respektive vorteilhafter ist.

Auch die Kunden-Lieferanten-Beziehung ist für einen Auftraggeber nicht unerheblich. Erfahrungen aus zurückliegenden Projekten oder Serienaufträgen ermöglichen dem Auftraggeber die Abschätzung des zukünftigen Betreuungsaufwands und die Zuverlässigkeit des Lieferanten hinsichtlich kritischer Termine, Qualität und Kundenservice.

7 Fazit und Ausblick

Der Wunsch ist, die Verschwendung für die Herstellung von Kunststoff-Metall-Bauteilen komplett zu eliminieren. Dies wird aber bei Losfertigung von mehrstufigen Prozessen und durch mehrfach belegte Fertigungssysteme nicht möglich sein. Daher stellt sich die Frage, was zu mehr Verschwendung führt. In kleinen Fertigungslosgrößen zu produzieren, sorgt für geringe Lagerbestände im Umlauf, dafür aber auch für höhere Rüstkosten.

Ist es vielleicht wirtschaftlich sinnvoll, ein mehrstufiges verkettetes Fertigungskonzept zu entkoppeln und autarke Fertigungsschritte mit minimalen Zykluszeiten und hoher Flexibilität zu wählen?

Investitionen in Fertigungssysteme (z.B. Automatisierungsmaßnahmen) sollen vor allem die Effektivität steigern. Ist dies aber auch die effizienteste Lösung, oder ist es effizienter teure Investitionen zu unterlassen? Welche Investitionen sind wirtschaftlich gerechtfertigt und welche nicht?

Ziel ist es, die Verschwendungen bereits in der Angebotsausarbeitung bei der Auswahl des Fertigungskonzeptes zu minimieren. Die heutige Anwendung hat aber noch zu wenige betrachtete Elemente (siehe links in Abbildung 7-1).

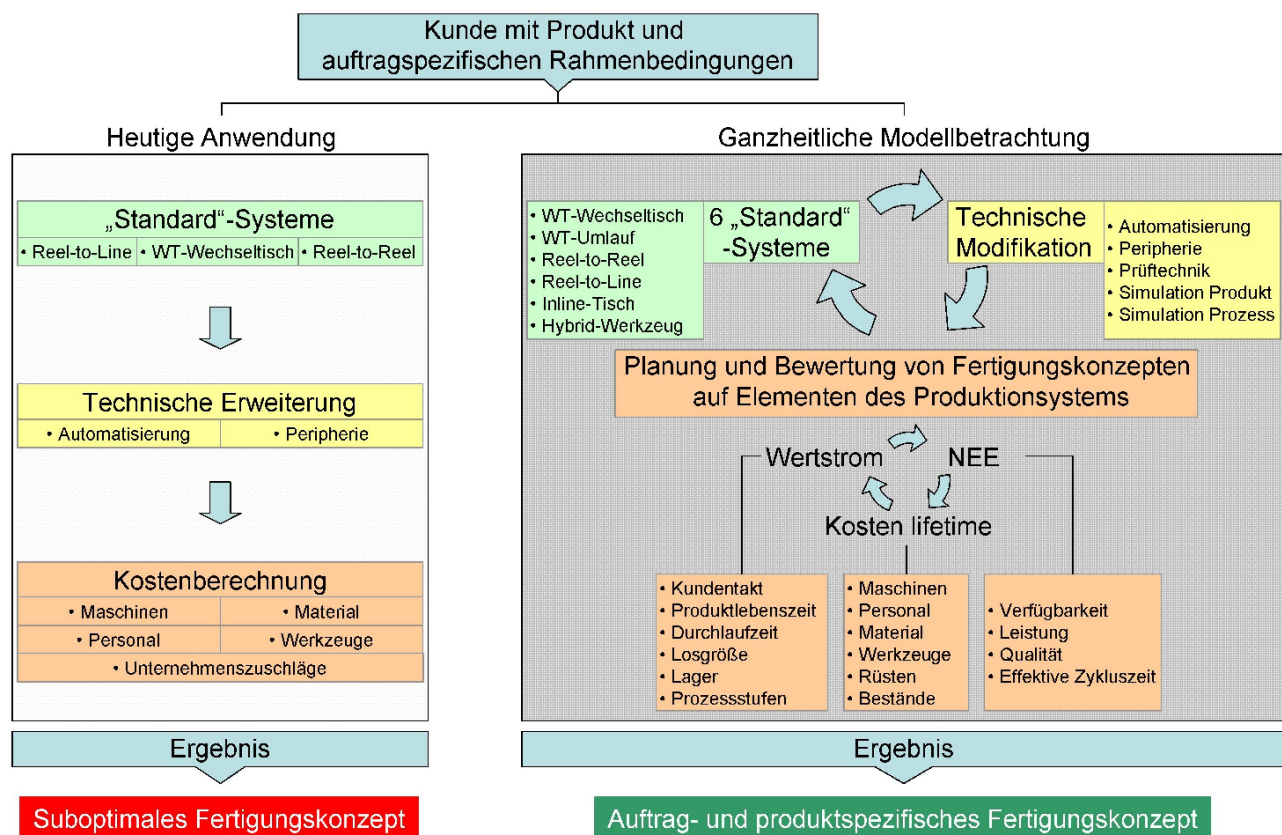


Abbildung 7-1: Heutige Betrachtung versus ganzheitliche Modellbetrachtung

Es sind noch nicht alle auf dem Markt bestehenden Standard-Systeme hinreichend bekannt und die technische Erweiterung von diesen Systemen wird zu häufig von der Jahresstückzahl abhängig

gemacht. Die Berechnung der Kosten könnte transparenter durchgeführt werden und unternehmensspezifische Einflüsse bzw. Standards (wie z.B. Gemeinkosten oder anderweitige Zuschlagsfaktoren) lassen eine explizite Produktsicht nicht zu.

Die ganzheitliche Modellbetrachtung hingegen bewertet geplante Fertigungskonzepte hinsichtlich der Kosten für die gesamte Produktlebenszeit durch eine geringe Anzahl an technischen Informationen (siehe rechts in Abbildung 7-1).

Es sind mit konstanten Rahmenbedingungen detaillierte Analysen, Optimierungen und Vergleiche von Fertigungskonzepten möglich.

Dabei wird das Produkt in den Mittelpunkt gestellt und es ergibt sich eine neue Sichtweise für das Produkt und den Kostenrahmen für den gesamten Produktlebenszyklus. Dieser spezielle Blickwinkel ermöglicht mit Anwendung des Modells Gegenüberstellungen von Fertigungskonzepten, unabhängig davon, ob die Konzepte Fertigungssysteme mit vielen Produkten oder Fertigungssysteme mit integrierten Sondermaschinen für nur ein Produkt beinhalten. Die Prozesse können auch autark oder miteinander verkettet sein.

Steht das Produkt im Zentrum der Betrachtung, so kommt dem Produktlebenszyklus eine wichtige Bedeutung zu. Er ist u.a. die Basis für Maschinenstundensätze, unterschiedliche Werkzeugkonzepte, Anzahl Rüstvorgänge, Bestandskosten bzgl. Sicherheit, etc. Dennoch wird kein Auftraggeber mit Gewissheit konkret voraussagen können, wie sich der Kundentakt und die Dauer des Produktlebenszyklus in der Zukunft exakt darstellen wird.

Typischerweise beginnen die detaillierten Analysen von Fertigungskonzepten durch Prozessoptimierer und Lean-Fachleuten zum Start der Serienproduktion oder bei gravierenden technischen Problemen. Im schwerwiegendsten Fall kann es zu einer kompletten Neugestaltung von Fertigungskonzepten kommen. Solche Situationen gilt es durch einen vorausschauenden Blick zu vermeiden.

Aber keine der Technologien Kunststoffspritzgießen, Stanzen oder Galvanisieren ist aus allgemeiner Sicht eindeutig in allen kostenverursachenden Segmenten alleinig dominant.

Das Stanzen beinhaltet das relativ teure Material, dafür aber eine kurze Zykluszeit und somit verhältnismäßige geringe Maschinen- und Personalkosten, vor allem auf Stanzautomaten, die mehrfach mit unterschiedlichen Produkten belegt sind.

Galvanikanlagen besitzen im Vergleich zu den anderen Technologien sehr hohe Anschaffungskosten und sind fast ausschließlich für ein großes Produktspektrum ausgelegt. Dennoch kann die kurze Zykluszeit für niedrige Personalkosten sorgen. Dafür sind die Anfahrteile bei Produktionsbeginn und die Rüstzeiten nicht zu unterschätzen. Wird auf das Produkt Edelmetall aufgebracht, so können die Materialkosten signifikant ansteigen.

Das Kunststoffspritzgießen mittels der Inserttechnik als Integrationsverfahren bringt aufgrund der Komplexität und der Einflussmöglichkeiten schnell ungewollte Verluste mit sich. Die vergleichsweise langsame Zykluszeit sorgt für eine längere Maschinenlaufzeit und somit zwangsweise für höhere Personalkosten. Vor allem bei verketteten Fertigungssystemen muss das Personal in allen Technologien Kompetenzen besitzen. Technisch sind in diesem integrierten Fertigungssystem oftmals die meisten Herausforderungen zu finden. Der Input (das einzulegende Insert) muss in der Regel für den Prozess, vor allem in den Dichtbereichen, genauer sein als das fertige Kunststoff-

Metall-Bauteil. Weiterhin sind bei dieser erforderlichen Präzision auch reproduzierbare Einlegesystematiken unbedingt notwendig. Das Zusammenspiel des Produktverhaltens im Prozess durch die zeitabhängige Schwindung des Kunststoffs, gepaart mit der Automatisierung des Prozesses, ist für die Produkt- und Prozessgestaltung sehr wichtig. Die Simulation kann hier unterstützend helfen, die richtigen Tendenzen abzuschätzen, um ggfs. Vorkehrungen vornehmen zu können. Idealerweise hat man zu diesem Zeitpunkt noch Einfluss auf das Produktdesign, d.h. mit der Simulation darf schon sehr früh im Produktentstehungsprozess begonnen werden. Die Automatisierung sollte aus Produktsicht angemessen und wirtschaftlich vertretbar sein. Üblicherweise ist das Kunststoffspritzgießen auch der letzte oder vorletzte Fertigungsschritt, so dass hier die zu prüfenden Merkmale am Produkt immer wichtiger werden, innerhalb der Toleranz zu liegen. Gekoppelt mit dem Anspruch an eine Null-Fehler-Produktion stehen häufig mit dem Fertigungsschritt verkettete Prüfsysteme zur Diskussion. Es ist nicht nur das Thema von der Ausschleusung von Ausschussteilen und dem Vorbeugen von Kundenreklamationen, sondern auch die frühzeitige Identifizierung von Toleranzabweichungen oder Eingriffsgrenzen, um Materialverschwendungen entgegenzuwirken oder zu unterbinden.

Kunststoff-Metall-Bauteile sind in Ihrer Gesamtheit von vielen Einflussparametern betroffen. Die individuelle Betrachtung für kundenspezifische Produkte ist unumgänglich. Dabei spielen vor allem die auftragsspezifischen Rahmenbedingungen des Kunden eine wichtige Rolle.

Die teilweise angepassten Methoden aus dem Produktionssystem bringen in diesem Modell eine systematische sowie ganzheitliche Analyse des Fertigungskonzeptes hervor und ergänzen sich gegenseitig. Die Effektivitätsbetrachtung mit der Kennzahl Net Equipment Effectiveness bewertet die wertschöpfenden Tätigkeiten jedes einzelnen Fertigungssystems. Die dabei erfolgte Unterteilung der Verlust-Faktoren bringt zusätzliche Transparenz und Verbesserungspotentiale mit sich sowie das Bewusstsein für den Modellanwender über die kostenkritischsten Fertigungssysteme. Der Wertstrom gibt auch Aufschluss über die nicht wertschöpfenden Tätigkeiten und visualisiert das gesamte Fertigungskonzept. Er bezieht vor- und nachgelagerte Unternehmen mit ein und liefert eine Vorstellung von den Kundenanforderungen im Kundentakt. Weiterhin beinhaltet der Wertstrom die Menge an Ressourcen (Maschinen und Personal), die durch den Net Equipment Effectiveness nicht abgebildet werden.

Der präventive Ansatz, Effektivitäten und Verschwendungen zu bewerten und die Verschwendungen proaktiv zu vermeiden, ist unbedingt erforderlich. Die Differenzierungen der einzelnen Effektivitäten und Verschwendungen schaffen Kostentransparenz und helfen beim zielgerichteten Handeln. Dadurch können notwendige Aufgabenfelder identifiziert und an der richtigen Stelle priorisiert werden. Nicht nur Anpassungen an einem Fertigungssystem oder einem ganzen Fertigungskonzept, sondern auch Designanpassungen am Produkt können hohe Einsparpotentiale bieten.

Der Hersteller, welcher alle Technologien und das Know-How unter einem Dach vereint, hat die größten Möglichkeiten Fertigungskonzepte durch die gesamte Prozesskette zu optimieren, um sich

so Wettbewerbsvorteile zu verschaffen. Wichtig ist jedoch, dass Auftraggeber und Auftragnehmer gemeinsames Verständnis für optimierte Fertigungskonzepte besitzen. Nur Win-Win-Situationen machen beide Partner zusammen als Einheit anderen gegenüber überlegen. Zu überhöhten Preisen anzubieten oder zu extrem günstigen Preisen einzukaufen wird kurzfristig nur einem und mittelfristig vermutlich keinem der beiden Vertragspartner Vorteile verschaffen.

In der Praxis können die Produzenten von Kunststoff-Metall-Bauteilen die Fertigungskonzepte noch weiter optimieren. Es gibt Potentiale, die durch eine detaillierte Feinplanung (aber unter höherem Kapazitätsaufwand) auszuarbeiten sind. An die jeweiligen Situationen und Rahmenbedingungen angepasste Fertigungskonzepte helfen, Investitionen erst zum erforderlichen Zeitpunkt bedarfsbezogen einzusetzen. Solche Stufenkonzepte entlang des Produktlebenszyklus sind eine Möglichkeit, um noch weitere Potentiale zu erschließen.

Aber nicht nur Fertigungskonzepte der Inserttechnik können mit dem vorgestellten Modell bewertet werden, sondern es besitzt die Offenheit für weitere Einsatz- und Anwendungsmöglichkeiten von anderweitigen Fertigungstechnologien, Herstellungsverfahren oder Produkten.

Das Modell ist in der Lage, unabhängig vom eingehenden Produktzustand oder Produktart im Wareneingang (Rohstoffe oder Zwischenprodukte) die Kostenberechnung durchzuführen. Damit können Unternehmen entlang der gesamten Lieferantenkette das Modell für Ein- oder Mehrfachkomponenten mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Einzelteilen oder Baugruppen anwenden. Der Einsatz ist von der einfachen Produktbearbeitung, z.B. mittels einer Fräsmaschine an einem Produkt, über eine Montage von mehreren Produkten zu einem Bauteil bis hin zur Verfahrensintegration von Fertigungstechnologien möglich. Beispielsweise kann die Kombination von Kunststoffspritz- und Metallocdruckgießen in einem Mehrkomponenten-Spritzgießprozess untersucht und mit anderen Technologien hinsichtlich der Kosten verglichen werden.

Auch der Umgang mit der Fertigungstiefe (einstufige oder mehrstufige Fertigungen) erlaubt es dem Modell, zusätzlich eine große Bandbreite von Technologien, Herstellungsverfahren und Produkten kostenkalkulatorisch erfassen und bewerten zu können.

Ganz gleich welche Verfahren in Fertigungskonzepten zur Produktherstellung auch eingesetzt werden, eines sollten sie gemeinsam haben. Es ist nicht das Ziel, in kurzer Zeit viele Teile zu produzieren, wenn kein Abnehmer für die Ware vorhanden ist. Sondern es geht um die richtige Menge an Produkten zum richtigen Zeitpunkt und am richtigen Ort.

Es wird Verschwendung geben, die Frage ist nur, mit welchem Konzept ist die Verschwendung am geringsten und welches Risiko ist das Unternehmen für die Produktherstellung bereit einzugehen.

Die Verfahrensintegration von mehreren Technologien in einem Fertigungssystem wird langfristig der Weg zur weiteren Vermeidung von Verschwendung sein, um die Gesamtkosten eines Fertigungskonzeptes weiter verringern zu können.

8 Zusammenfassung

Kunststoff-Metall-Bauteile in der Kontakt- und Verbindungstechnik verzeichnen in vielen Märkten und Branchen steigende Wachstumszahlen. Die Kombination der beiden Materialien Kunststoff und Metall bieten neuen Produkten innovative Möglichkeiten bei der Designgestaltung. Typische Produkte sind umspritzte Gehäuse, Vorumspritzlinge, hybride Stecker oder Leiterplattenverbinder, die ihre Anwendung in Steuergeräten oder anderen mechatronischen Baugruppen finden.

Der Wettbewerb für die Herstellung dieser Produkte ist groß und steigt international weiter an. Viele klassische Kunststoffspritz- oder Stanzbetriebe erweitern ihren Kompetenzbereich, um solche Produkte herstellen zu können.

Der Qualitätsanspruch an diese Produkte ist aber vor allem in der potentialträchtigen Automobilbranche sehr hoch. Weiterhin nimmt die Variantenvielfalt zu und der Entwicklungszeitraum ab. Bereits in einem sehr frühen Entwicklungsstadium wird nach den Kosten für den Serienzustand gefragt, bevor überhaupt die ersten Prototypen hergestellt werden. Die Verbindlichkeit von Angeboten, auch in diesem frühen Stadium, drängt die Hersteller von Kunststoff-Metall-Bauteilen dazu, möglichst alle kostenrelevanten Einflüsse zu berücksichtigen. Dazu zählen nicht nur das reine Produkt, sondern auch die Rahmenbedingungen des Kunden (wie z.B. der Kundentakt, der die Abrufzahlen im Zeitintervall darstellt oder die Dauer des Produktlebenszyklus).

Für die Aufgabenstellung der Kostenkalkulation von Fertigungskonzepten liefert diese Arbeit ein anwenderorientiertes Lösungsmodell auf der Basis eines wissenschaftlichen Ansatzes.

Nach der Erklärung einiger grundlegenden Begriffe wird das Verfahren der Inserttechnik vorgestellt, mit denen sich Kunststoff-Metall-Bauteile herstellen lassen, gefolgt von den Einsatzbereichen der Produkte und die auf dem Markt zur Verfügung stehenden Standard-Fertigungssystemen zur Produktion.

Die zeitliche Einordnung der Planung von Fertigungskonzepten im Produktentstehungsprozess ist möglich. Weiterhin kann das Produktverhalten des Kunststoff-Metall-Bauteils (speziell Schwindung und Verzug) im Prozess mittels Simulation abgeschätzt werden, um bei der Erprobung möglichst wenige Rekursionen bis zum Serienstart zu benötigen. Hierzu sind die Kenntnisse für die Prozessgestaltungen und Automatisierungsmöglichkeiten einzelner Fertigungssysteme notwendig. Orientierend am Vorbild des Toyota Produktionssystems sind weiterführend zwei zusätzliche Methoden im Modell integriert, die Verschwendungen hervorheben sollen. Das untypische, aber absolut erforderliche, ist die proaktive Einschätzung der erwarteten Verluste. Der Net Equipment Effectiveness betrachtet die Effektivitäten einzelner Fertigungssysteme in Kombination von Maschine, Peripherie, Werkzeug und Mensch. Die Untergliederung in die Verlust-Faktoren Verfügbarkeit, Leistung und Qualität bietet eine zusätzliche Feingliederung von Verschwendungen im Sinne des Toyota-Modells.

Die zweite Methode ist das Wertstromdesign, bei dem die gesamte Prozesskette vom Wareneingang bis zum Warenausgang inkl. der auftragsspezifischen Rahmenbedingungen des Kunden sichtbar werden. Alle für das Modell notwendigen Informationen sind hier zu finden. Die Fertigungssysteme inkl. Ressourcen, Rüstzeiten, Zykluszeiten, Losgrößen, etc. und auch die Verlust-Faktoren vom Net Equipment Effectiveness sind hier aufgeführt. Weiterhin sind alle Lager

mit ihren Bestandsmengen aufgeschlüsselt. Da es zu diesem Zeitpunkt noch kein reales Produkt gibt, fließen einige Randbedingungen zur einheitlichen Vorgehensweise in das Modell mit ein. Diese umfassende und doch sehr einfache Darstellung erhöht das Erkennen von Verlust-Schwerpunkten und Kostentreibern manchmal schon auf den ersten Blick.

Anpassungen am Fertigungskonzept sind somit möglich, wie z.B. das Optimieren der Losgröße oder das Reflektieren von Automatisierungsmaßnahmen. Auch der Vergleich von unterschiedlichen Fertigungskonzepten mit Bezug auf den gesamten Produktlebenszyklus bringen interessante Erkenntnisse für die richtige Auswahl.

Unabhängig davon, welche Entscheidung auch getroffen wird, existiert derzeit kein Fertigungskonzept ohne Verschwendungen. Das Idealbild im Sinne von Toyota ist und bleibt aus heutiger Sicht ein ungreifbares Ziel. Aber das Unternehmen, welches die Gesamtkosten von zukünftigen bzw. geplanten Fertigungskonzepten kennt sowie technisch und wirtschaftlich entsprechend optimieren kann, besitzt klare Wettbewerbsvorteile gegenüber seinen Marktbegleitern.

9 Summary

Plastic-metal-components in the contact and connection technology have rising growth figures in many markets and industries. The combination of the two materials plastic and metal offer new opportunities for innovative product design. Typical products are molded housings, premolded parts, hybrid or plug board connectors, which find their application in control devices or other mechatronic assemblies.

The competition for the manufacture of these products is large and growing internationally.

Many of the classic companies in plastic injection molding or punching extend their competences to manufacture such products. The quality requirements for these products are particularly high in the attractive automotive business. Furthermore the number of variants is increasing and the development periods become shorter. Already at a very early development phase, the questions for the serial conditions appear, even before the first prototypes are being produced. The binding character of offers, even at this early state, pushes the manufacturers of plastic-metal-components to consider all possible cost-related factors. These include not only the pure product, but also the customer conditions (such as the cycle time, which is the demand numbers in the time interval or the duration of the product life cycle).

For this problem this thesis provides a user-oriented solution model based on a scientific approach. After explaining some basic terms the insert technique is presented which can be used to manufacture plastic-metal-components. Followed by the product application areas and from market available standard manufacturing systems for their production. The timing coordination for the planning of production concepts in the product development process is possible. Furthermore, the product behaviors of plastic-metal-components in the process (especially shrinkage and warping) could be estimated in simulations to require as few as possible testing recursions until the start of production. For this purpose the knowledge of process design and automation possibilities for individual production systems are required. The model contains two additional methods in style of the Toyota Production System to highlight waste. The untypical, but absolutely necessary, is the proactive estimation of expected losses. The Net Equipment Effectiveness looks at the efficiencies of individual production systems in combination of machine, peripherals, tools and personnel. The breakdown in the loss-factors availability, performance and quality provide an additional fine structure of waste as defined by Toyota.

The second method is the value stream mapping, in which the entire process chain from incoming goods to outgoing goods including order specific conditions of the customer are visualized. All necessary information for the model can be found here. The manufacturing systems including resources, set-up times, cycle times, lot sizes, etc. Even the loss factors of Net Equipment Effectiveness are listed here. Furthermore, all storage areas are represented with their stock quantity. There are some boundary conditions in the model for uniform handling because at this time there is still no real product. This comprehensive but simple presentation increases the detection of loss-priorities and cost drivers sometimes even at first sight.

Adjustments to the production concept are possible such as optimizing the lot size or reflecting measures of automation. A comparison of different manufacturing concepts with relation to the entire product life cycle shows interesting knowledge for the correct selection.

Regardless what decision is made, there is currently no production concept without waste. From today's point of view the ideal image as defined by Toyota is and remains an unreachable target. But the company that comes closest to this aim, has a clear competitive advantage over its competitors.

But the company that knows the total costs of planned future manufacturing concepts and is able to optimize the concepts technically and economically, has a clear competitive advantage over its competitors.

10 Anhang

Kosten lifetime [Euro]																	
	Maschinen	Abw.	Personal	Abw.	Material	Abw.	Bestände	Abw.	Rüsten	Abw.	Werkzeuge	Abw.	Gesamt Kosten	Abw.			Abw.
1	25%	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	563.220	0,00%	106.973	0,00%	335.500	7.033.404	0,00%			0,00%
2	0	1.049.129	14,98%	1.064.706	25,00%	5.329.398	25,00%	558.181	-0,89%	133.650	24,94%	402.000	8.537.064	19,82%			21,38%
3	2%	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	563.220	0,00%	106.973	0,00%	335.500	7.033.404	0,00%			0,00%
4	5%	958.049	5,00%	851.765	0,00%	4.348.789	2,00%	571.872	1,54%	108.153	1,10%	335.500	7.128.507	0,00%			1,35%
5	2%	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	566.767	0,63%	107.046	0,07%	335.500	7.082.646	0,00%			0,70%
6	2%	923.664	1,23%	868.800	2,00%	4.263.519	0,00%	564.414	0,21%	107.903	0,87%	335.500	7.052.564	0,00%			0,27%
7	20%	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	565.352	0,38%	107.017	0,04%	335.500	7.063.852	0,00%			0,43%
8	mit 95%	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	563.220	0,00%	116.075	8,51%	335.500	7.042.507	0,00%			0,13%
9	mit 95%	893.252	-2,10%	811.644	-4,71%	4.263.519	0,00%	558.696	-0,80%	106.892	-0,08%	335.500	6.969.502	0,00%			-0,91%
10	mit 99%	904.261	-0,90%	824.819	-3,16%	3.959.030	-7,14%	529.664	-5,96%	102.669	-4,02%	335.500	6.655.944	0,00%			-5,37%
11	20%	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	563.220	0,00%	119.265	11,49%	335.500	7.045.697	0,00%			0,17%
12	20%	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	675.864	20,00%	89.144	-16,67%	335.500	7.128.220	0,00%			1,35%
13	20%	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	675.864	20,00%	106.973	0,00%	335.500	7.146.049	0,00%			1,60%
14	5%	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	563.220	0,00%	106.973	0,00%	352.275	7.050.179	5,00%			0,24%
15	10%	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	563.220	0,00%	106.973	0,00%	335.500	7.033.404	0,00%			0,00%
16	2%	915.596	0,35%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	569.642	1,14%	106.978	0,00%	335.500	7.042.999	0,00%			0,14%
17	4%	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	585.749	4,00%	106.973	0,00%	335.500	7.055.933	0,00%			0,32%
18	2%	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.348.789	2,00%	571.872	1,54%	108.153	1,10%	335.500	7.128.507	0,00%			1,35%

■ Erhöhung zur Ausgangssituation
■ Verringerung zur Ausgangssituation
■ ohne Auswirkung

Tabelle 10-1 Berechnungsergebnisse der Kosten durch die Erhöhung der Einflussparameter des Fallbeispiels, Datenbasis für Abbildung 4-31

Kosten lifetime [Euro]																
		Maschinen	Abw.	Personal	Abw.	Material	Abw.	Bestände	Abw.	Rüsten	Abw.	Werkzeuge	Abw.	Gesamt Kosten	Abw.	
		Ausgangssituation	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	563.220	0,00%	106.973	0,00%	335.500	0,00%	7.033.404	0,00%
1	-25%	Teilebedarf lifetime	766.513	-15,99%	638.824	-25,00%	3.197.639	-25,00%	570.676	1,32%	80.283	-24,95%	335.500	0,00%	5.589.435	-20,53%
2	-5%	Produktlebenszeit	888.948	-2,57%	809.177	-5,00%	4.050.343	-5,00%	546.497	-2,97%	101.661	-4,97%	335.500	0,00%	6.732.125	-4,28%
3	-2%	Materialeinsatz	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.178.248	-2,00%	554.568	-1,54%	105.792	-1,10%	335.500	0,00%	6.938.302	-1,35%
4	-5%	Maschinenstundensatz	866.807	-5,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	559.673	-0,63%	106.900	-0,07%	335.500	0,00%	6.984.163	-0,70%
5	-2%	Personalstundensatz	912.428	0,00%	834.729	-2,00%	4.263.519	0,00%	562.026	-0,21%	106.043	-0,87%	335.500	0,00%	7.014.245	-0,27%
6	-2%	Zykluszeit	901.134	-1,24%	834.729	-2,00%	4.263.519	0,00%	561.084	-0,38%	106.929	-0,04%	335.500	0,00%	7.002.894	-0,43%
7	-20%	Rüstzeit	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	563.220	0,00%	97.870	-8,51%	335.500	0,00%	7.024.302	-0,13%
8	mit 85%	Verfügbarkeits-Faktor	977.739	7,16%	951.972	11,76%	4.263.519	0,00%	575.700	2,22%	107.231	0,24%	335.500	0,00%	7.211.662	2,53%
9	mit 85%	Leistungs-Faktor	957.033	4,89%	907.132	6,50%	4.263.519	0,00%	570.701	1,33%	107.142	0,16%	335.500	0,00%	7.141.026	1,53%
10	mit 95%	Qualitäts-Faktor	927.641	1,67%	859.549	0,91%	4.712.842	10,54%	611.471	8,57%	113.441	6,05%	335.500	0,00%	7.560.444	7,49%
11	-20%	Qualitätsverlust Rüsten	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	563.220	0,00%	94.680	-11,49%	335.500	0,00%	7.021.112	-0,17%
12	-20%	Losgröße	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	450.576	-20,00%	133.716	25,00%	335.500	0,00%	6.947.504	-1,22%
13	-50%	Bestandsmenge	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	281.610	-50,00%	106.973	0,00%	335.500	0,00%	6.751.794	-4,00%
14	-5%	Grund-Werkzeug	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	563.220	0,00%	106.973	0,00%	318.725	-5,00%	7.016.629	-0,24%
15	-10%	Lebensdauer Werkzeuge	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	563.220	0,00%	106.973	0,00%	384.500	14,61%	7.082.404	0,70%
16	-2%	Zinsen bzw. Zinsfaktor	909.260	-0,35%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	556.860	-1,13%	106.967	0,00%	335.500	0,00%	7.023.871	-0,14%
17	-5%	Lagerfaktor	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	535.059	-5,00%	106.973	0,00%	335.500	0,00%	7.005.243	-0,40%
18	-2%	Rohstoffpreise	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.178.248	-2,00%	554.568	-1,54%	105.792	-1,10%	335.500	0,00%	6.938.302	-1,35%

<div><div></div><div></div><div></div></div>	Erhöhung zur Ausgangssituation
<div><div></div><div></div><div></div></div>	Verringerung zur Ausgangssituation
<div><div></div><div></div><div></div></div>	ohne Auswirkung

■	Erhöhung zur Ausgangssituation
■	Verringerung zur Ausgangssituation
■	ohne Auswirkung

Tabelle 10-2: Berechnungsergebnisse der Kosten durch die Verringerung der Einflussparameter des Fallbeispiels, Datenbasis für Abbildung 4-31

Kosten lifetime [Euro]														
	Maschinen	Abw.	Personal	Abw.	Material	Abw.	Bestände	Abw.	Rüsten	Abw.	Werkzeuge	Abw.	Gesamt Kosten	Abw.
Ausgangssituation	912.428	0,00%	851.765	0,00%	4.263.519	0,00%	225.288	0,00%	267.432	0,00%	335.500	0,00%	6.855.931	0,00%
Optimierung	998.857	9,47%	895.641	5,15%	4.102.753	-3,77%	222.206	-1,37%	262.044	-2,01%	335.500	0,00%	6.817.000	-0,57%

■ Erhöhung zur Ausgangssituation

■ Verringerung zur Ausgangssituation

■ ohne Auswirkung

Tabelle 10-3: Berechnungsergebnisse der technischen Erweiterung des Fallbeispiels, Datenbasis für Abbildung 5-2

		Alternative 1 für FS 3 bis 5	Alternative 2 für FS 3 bis 5
Basisdaten Fertigungssystem		Reel-to-Line	WT-Umlauf
Anschaffungswert	[Euro]	650.000	750.000
Wiederbeschaffungswert (WBW)	[Euro]	706.515	815.210
Produktlebenszeit	[Jahre]	7	7
Energieverbrauch inkl. Peripherie	[kWh]	51	51
Stromkosten	[Euro/kWh]	0,1	0,1
Faktor Instandhaltung und Wartung vom WBW	%	3	3
Platzbedarf	[qm]	90	70
Raumiete (jährlich)	[Euro/qm]	96	96
Betriebsstoffe	[Euro/h]	1,5	1,5
Zinssatz	%	10	10

Jährliche Maschinenkosten			
Kalkulatorische Abschreibung	[Euro/Jahr]	100.930,76	116.458,57
Kalkulatorische Zinsen	[Euro/Jahr]	32.500,00	37.500,00
Energiekosten	[Euro/Jahr]	18.806,26	15.366,15
Kosten für Instandhaltung und Wartung	[Euro/Jahr]	21.195,46	24.456,30
Raumkosten	[Euro/Jahr]	8.640,00	6.720,00
Betriebsstoffkosten	[Euro/Jahr]	5.531,25	4.519,45
Summe Maschinenkosten	[Euro/Jahr]	187.603,73	205.020,47

Jährliche Maschinenlaufzeiten			
Maschinenlaufzeit durch Produkt	[h/Jahr]	3399,50	3012,97
Maschinenlaufzeit durch andere Produkte	[h/Jahr]	288,00	0,00
Summe Maschinenlaufzeit	[h/Jahr]	3687,50	3012,97

Maschinenstundensatz			
Maschinenstundensatz	[Euro/h]	50,88	68,05

Tabelle 10-4: Basisdaten (fiktiv) und Berechnung der Maschinenstundensätze für die alternativen Systeme, Datenbasis für Tabelle 5-3

■	Erhöhung zur Ausgangssituation
■	Verringerung zur Ausgangssituation
■	ohne Auswirkung

Tabelle 10-5: Berechnungsergebnisse der alternativen Fertigungskonzepte des Fallbeispiels, Datenbasis für Abbildung 5-3

11 Literaturverzeichnis

- [Ada98] Adam, D. „Produktions-Management“, 9. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 1998
- [Bau11] Bauer, R. „Spritzgieß-Stanzen oder Stanz-Spritzgießen“, Plastverarbeiter 62, Hüthing GmbH, Heidelberg, Nr. 2, 2011, S. 16-17
- [BBO07] Baur, E.
Brinkmann, S.
Osswald, T.
Schmachtenberg, E. „Saechtling Kunststoff-Taschenbuch“, 30. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2007
- [BCG10] Buzacott, J. A.
Corsten, H.
Gössinger, R.
Schneider, H. M. „Produktionsplanung und –steuerung - Grundlagen, Konzepte und integrative Entwicklungen“, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2010
- [Bec94] Becker, R. „Technische Thermoplaste - Hochleistungskunststoffe“, Carl Hanser Verlag, München, 1994
- [Ben96] Bender, D. „Polystyrol“, Carl Hanser Verlag, München, 1996
- [Bie08] Biedermann, H. „Ersatzteilmanagement - Effiziente Ersatzteillogistik für Industrieunternehmen“, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2008
- [Bon02] Bonten, C. „Produktentwicklung - Technologie-Management für Kunststoffprodukte“, Carl Hanser Verlag, München, 2002
- [Bra09] Branz, P. „Effizienz und Effektivität von Marketingkooperationen“, 1. Auflage, Josef Eul Verlag, Lohmar, 2009
- [Bru08] Brunner, F. J. „Japanische Erfolgskonzepte“, Carl Hanser Verlag, München, 2008
- [Bry97] Bryce, D. M. „Plastic Injection Molding“, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, 1997
- [BS04a] Broecheler, K.
Schönberger, C. „Six Sigma für den Mittelstand - Weniger Fehler, zufriedene Kunden und mehr Profit“, Campus Verlag, Frankfurt am Main, 2004

- [BS04b] Becker, J.
Schütte, R. „Handelsinformationssysteme“, 2. Ausgabe, Redline Wirtschaft bei Verl. Moderne Industrie, Frankfurt am Main, 2004
- [BS10] Bellgran, M.
Säfsten, K. „Production Development - Design and Operations of Production Systems“, Springer Verlag, London, 2010
- [BW08] Brunner, F. J.
Wagner, K. W. „Taschenbuch Qualitätsmanagement - Leitfaden für Studium und Praxis“, 4. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2008
- [CPH04] Chang, R.-Y.
Peng, Y.-H.
Hsu, D. C. „Three-dimensional insert molding simulation in injection molding“, Society of Plastics Engineers, ANTEC 2004
- [CT02] Crawford, R. J.
Throne, J. L. „Rotational Molding Technology“, William Andrew Publishing, Norwich, 2002
- [Dan01] Dangelmaier, W. „Fertigungsplanung - Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung“, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2001
- [Dan09] Dangelmaier, W. „Theorie der Produktionsplanung und -steuerung“, Springer Verlag, Berlin, 2009
- [DEE05] Domininghaus, H.
Elsner, P.
Eyerer, P.
Hirth, T. „Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften“, 6. Ausgabe, Springer Verlag, Berlin, 2005
- [Der95] Derstroff, M. C. „Mehrstufige Losgrößenplanung mit Kapazitätsbeschränkungen“, Physika-Verlag, Heidelberg, Dissertation Universität Braunschweig, 1995
- [DHL09] Dombrowski, U.
Herrmann, C.
Lacker, T.
Sonnentag, S. „Modernisierung kleiner und mittlerer Unternehmen - ein ganzheitliches Konzept“, Springer Verlag, Berlin, 2009
- [Dic09] Dickmann, P. „Schlanker Materialfluss mit Lean Production, Kanban und Innovationen“, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2009
- [DIN82] DIN 16901 „DIN 16901 - Kunststoff-Formteile: Toleranzen und Abnahmebedingungen für Längenmaße“, Beuth Verlag, Berlin, 1982

- [Dol06] Dolcemascolo, D. „Improving the extended value stream - lean for the entire supply chain“, Productivity Press, New York, 2006
- [Dug02] Duggan, K. J. „Creating mixed model value streams - practical lean techniques for building to demand“, Productivity Press, New York, 2002
- [EEH08] Elsner, P.
Eyerer, P.
Hirth, T. „Domininghaus - Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen“, 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2008
- [EHE08] Eyerer, P.
Hirth, T.
Elser, P. „Polymer Engineering - Technologien und Praxis“, Springer Verlag, Berlin, 2008
- [Ehr04] Ehrenstein, G. W. „Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik“, Carl Hanser Verlag, München, 2004
- [ER05] El-Haik, B.
Roy, D. M. „Service Design for Six Sigma - a road map for excellence“, John Wiley & Sons, Hoboken, 2005
- [Erh08] Erhard, G. „Konstruieren mit Kunststoffen“, 4. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2008
- [Erl07] Erlach, K. „Wertstromdesign - Der Weg zur schlanken Fabrik“, 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2007
- [Erl10] Erlach, K. „Wertstromdesign - Der Weg zur schlanken Fabrik“, 2. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2010
- [FDR94] Fandel, G.
Dyckhoff, H.
Reese, J. „Industrielle Produktionsentwicklung: Eine empirisch-deskriptive Analyse“, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1994
- [Fil10] Filz, P. F. „Simulieren statt probieren“, Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, Nr. 2, 2010, S. 34-37
- [Fri07] Fritz, J. U. „Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der Digitalen Fabrik“, Saarbrücken, Dissertation Universität des Saarlandes, 2007
- [Gas07] Gastrow, H. O. „Der Spritzgieß-Werkzeugbau in 130 Beispielen“, 6. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2007

- [Gel11] Geldmann, U. „Wertanalyse - das Tool im Value Management“, 6. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2011
- [GGE01] Gausemeier, J.
Grafe, M.
Ebbesmeyer, P.
Weinert, K „Spanende Fertigung“, 3. Ausgabe, Vulkan-Verlag, Essen, 2001
- [GGR92] Glaser, H.
Geiger, W.
Rode, V. „PPS - Produktionsplanung und –steuerung: Grundlagen, Konzepte, Anwendungen“, 2. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 1992
- [GKS07] Gienke, H.
Kämpf, R.
Steuder, S. „Handbuch Produktion - Innovatives Produktionsmanagement: Organisation, Konzepte, Controlling“, Carl Hanser Verlag, München, 2007
- [Göt10] Götze, U. „Kostenrechnung und Kostenmanagement“, 5. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2010
- [GT05] Günther, H.-O.
Tempelmeier, H. „Produktion und Logistik“, 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2005
- [Gud02] Gudehus, Timm „Dynamische Disposition“, Springer Verlag, Berlin, 2002
- [Gud10] Gudehus, Timm „Logistik - Grundlagen, Strategien, Anwendungen“, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2010
- [Gul09] Gulati, R. „Maintenance and Reliability Best Practices“, Industrial Press, New York, 2009
- [Han01] Hansen, R. C. „Overall Equipment Effectiveness - a powerful production/maintenance tool for increased profits“, 1. Auflage, Industrial Press, New York, 2001
- [Har07] Hartmann, E. H. „TPM - Effiziente Instandhaltung und Maschinenmanagement“, 3. Auflage, mi-Fachverlag, München, 2007
- [HD99] Hering, E.
Draeger, W. „Handbuch der Betriebswirtschaft für Ingenieure“, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1999

- [Her10] Herrmann, C. „Ganzheitliches Life Cycle Management - Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung im Unternehmen“, Springer Verlag, Heidelberg, 2010
- [Heß10] Heß, G. „Supply-Strategien in Einkauf und Beschaffung: Systematischer Ansatz und Praxisfälle“, 2. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2010
- [Hoe07] Hoeschen, A. „Varianten, Preisdruck und Termine“, Köln, 2007,
URL: <http://www.awf.de/download/Produktionssysteme-im-mittelstand-wzl.pdf>,
Download am 04.08.2011
- [Hol07] Hollander, J.-W. „Am laufenden Band“, Plastverarbeiter, Hüthing GmbH, Heidelberg, 2007, S.44-45
- [Hor10] Horsch, J. „Kostenrechnung - Klassische und neue Methoden in der Unternehmenspraxis“, Gabler Verlag, Wiesbaden 2010
- [HYT06] Huang, C.-T.
Yeh, C.-H.
Tseng, S.-C. „Geometrical effect and material selection in multi-component molding (MCM) development“, Society of Plastics Engineers, ANTEC 2006
- [Jab08] Jabs, G. „OEE - Overall Equipment Effectiveness - Gesamtanlagen-effektivität“, Institut für ganzheitliches Unternehmensmanagement, 2008,
URL: http://www.ifgu.de/downloads/oeo_jabs.pdf,
Download am 02.09.2011
- [Jar08] Jaroschek, C. „Spritzgießen für Praktiker“, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2008
- [Joh04] Johannaber, F. „Kunststoff-Maschinenführer“, 4. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2004
- [JM04] Johannaber, F.
Michaeli, W. „Handbuch Spritzgießen“, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2004
- [JW02] Jones, D. T.
Womack, J. P. „Seeing the whole - mapping the extended value stream“, Lean Enterprise Institute, Cambridge, 2002

- [Kal02] Kallien, L. H. „Von der Füllung bis zum Verzug in 3D“, K-Zeitung/Kunststoff-Berater, Giesel Verlag, Hannover, 2002, S. 35-40
- [KB01] Karlinger, P.
Bürkle, E. „Kurzzeitschwindung beim Mehrkomponenten-Spritzgießen“, Carl Hanser Verlag, München, 2001, S. 54-58
- [KB04] Kemmettmüller, W.
Bogensberger, S. „Handbuch der Kostenrechnung - Das Grundlagenwerk zu Kostenrechnung und Kostenmanagement“, Service Fachverlag, Wien, 2004
- [KB08a] Kamiske, G. F.
Brauer, J.-P. „ABC des Qualitätsmanagements“, 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2008
- [KB08b] Kamiske, G. F.
Brauer, J.-P. „Qualitätsmanagement von A bis Z - Erläuterungen moderner Begriffe des Qualitätsmanagements“, 6. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2008
- [Ken08] Kenter, I. M. „Laborskript Kostenrechnung“, Vorlesungsskript, Hochschule Bremen, 2008,
URL: http://www.hs-bremen.de/internet/einrichtungen/fakultaeten/f5/abt1/forschung/labore/fertigungstechnik/skript_kostenrechnung_2008.pdf,
Download am 21.11.2011
- [KEV08] Krahn, H.
Eh, D.
Vogel, H. „1000 Konstruktionsbeispiele für den Werkzeug- und Formenbau beim Spritzgießen“, Carl Hanser Verlag, München, 2008
- [KGJ09] Kummer, S.
Grün, O.
Jammernegg, W. „Grundzüge der Beschaffung“, Produktion und Logistik, 2. Auflage, Pearson Studium, München, 2009
- [KHL04] Kurz, U.
Hintzen, H.
Laufenberg, H. „Konstruieren, Gestalten, Entwerfen“, 3. Auflage, Vieweg und Teubner Verlag, Wiesbaden, 2004
- [Kie07] Kiel, E. „Antriebslösungen - Mechatronik für Produktion und Logistik“, Springer Verlag, Berlin, 2007
- [Kir07] Kircher, W. „Neue Märkte erschließen mit Hybridbauteilen und Oberflächenveredelung“, Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, Nr. 4, 2007

- [KK08] Klocke, F.
König, W. „Fertigungsverfahren - Drehen, Fräsen, Bohren“, 8. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2008
- [Kle02] Kleinebrahm, M. „Sonderanwendungen des Spritzgießens“, Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, Nr. 9, 2002, S. 114-116
- [Kle07] Kletti, J. „Konzeption und Einführung von MES-Systemen - Zielorientierte Einführungsstrategie mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, Fallbeispielen und Checklisten“, Springer Verlag, Berlin, 2007
- [Klu10] Klug, F. „Logistikmanagement in der Automobilindustrie - Grundlagen der Logistik im Automobilbau“, Springer Verlag, Berlin, 2010
- [KPP06] Kalweit, A.
Paul, C.
Peters, S.
Wallbaum, R. „Handbuch für technisches Produktdesign: Material und Fertigung - Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure“, Springer Verlag, Berlin, 2006
- [KMO09] Kiener, S.
Maier-
Scheubeck, N.
Obermaier, R.
Weiß, M. „Produktions-Management - Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung“, 9. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2009
- [KR03] Konold, P.
Reger, H. „Praxis der Montagetechnik“, 2. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2003
- [KR08] Koether, R.
Rau, W. „Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure“, 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2008
- [Kri10] Krix, P. „Eine Exportnation wehrt sich“, 6. Ausgabe, Automobilwoche, 2010, S. 9
- [KS00] Kallein, L. H.
Steinbach, J. „Simulation of Injection Moulding with 3D Volume Elements“, 18. CAD-FEM User Meeting, Friedrichshafen, 2000
- [Küh06] Kühn, W. „Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner“, Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [Kur05] Kurbel, K. „Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Ressource Planning und Supply Chain Management“, 6. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2005

- [KZ02] Klümper, B.
Zimmermann, E. „Die produktorientierte Kosten- und Leistungsrechnung“, Verlagsgruppe Jehle Rehm, München, 2002
- [Lan06] Landau, U. „Steckverbinder im Automobilbau“, 28. Ulmer Gespräch, Ulm, 2006
- [LDF06] Lucyshyn, T.
Duretek, I.
Fischer, K.
Langecker, G. R. „Spritzgießsimulation - Einfluss der Stoffdaten auf die Vorhersage von Schwindung und Verzug“, 19. Leobener Kunststoff-Kolloquium, Leoben, 2006
- [Lik04] Liker, J. K. „The Toyota Way - 14 management principles from the world's greatest manufacturer“, McGraw-Hill Verlag, New York, 2004
- [LK11] Lingohr, T.
Kruschel, M. „Best Practices im Value Management“, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2011
- [LM08] Liker, J. K.
Meier, D. P. „Praxisbuch - Der Toyota Weg“, 2. Auflage, FinanzBuch Verlag, München, 2008
- [Lö08] Lödding, H. „Verfahren der Fertigungssteuerung“, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2008
- [LW06] Lotter, B.
Wiendahl, H.-P. „Montage in der industriellen Produktion“, Springer Verlag, Berlin, 2006
- [LZ04] Lüscho, F.
Zitzke, E. „Projektleitung - Alle Rollen souverän meistern“, Carl Hanser Verlag, München, 2004
- [Mar09] Martin, H. „Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik“, 7. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- [Mäu09] Mäußler, E. „Overheadkosten“, SVG-Unternehmensberatung, Frankfurt am Main, 2009,
URL: http://www.logistik-bw.de/fileadmin/BENUTZERDATEN/Dateien-fuer-Seiten/Downloads/SVG_Overheadkosten.pdf,
Download am 12.09.2011

- [MBL95] Michaeli, W.
Brinkmann, T.
Lessenich-
Henkys, V. „Kunststoff-Bauteile werkstoffgerecht konstruieren“, Carl Hanser Verlag, München, 1995
- [MHP09] Michaeli, W.
Helbich, B.
Pütz, M.
Grönlund, O. „Ein Leitsystem zum perfekten Bauteil?“, Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, Nr. 10, 2009
- [Mic06] Michaeli, W. „Einführung in die Kunststoffverarbeitung“, 5. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [MMM00] Menges, G.
Michaeli, W.
Mohren, P. „How to make injection molds“, 3. Auflage, Hanser Gardner Publications, Cincinnati, 2000
- [MMM07] Menges, G.
Michaeli, W.
Mohren, P. „Spritzgießwerkzeuge - Auslegung, Bau, Anwendung“, 6. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2007
- [MRA09] Moro, J. L.
Rottner, M.
Alihodzic, B.
Weißbach, M. „Baukonstruktion vom Prinzip zum Detail“, Band 3, Springer Verlag, Berlin, 2009
- [MUZ06] Müller, A.
Uecker, P.
Zehbold, C.
Hug, W. „Controlling für Wirtschaftsingenieure, Ingenieure und Betriebswirte“, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [Nek03] Nekolar, A.-P. „e-Procurement - Euphorie und Realität“, Springer Verlag, Berlin, 2003
- [NKW10] Nyhuis, P.
Klemke, T.
Wagner, C. „Wandlungsfähige Produktionssysteme: Wandlungsfähigkeit - ein systematischer Ansatz“, GITO-Verlag, Berlin, 2010
- [N.N.94] N.N. „Tabellenbuch Metall“, 39. Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 1994

- [N.N.05] N.N. Deutsches Kupferinstitut, Werkstoff-Datenblatt CuSn6, Düsseldorf, 2005,
URL: http://www.kupfer-institut.de/front_frame/pdf/CuSn6.pdf,
Download am 08.11.2011
- [N.N.07] N.N. WEKA Praxishandbuch Plus - Kunststoffpraxis Konstruktion, 12. Ausgabe, WEKA Media GmbH, Kissing, 2007
- [N.N.08] N.N. „Klassifikation der Wirtschaftszweige mit Erläuterungen“, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2008,
URL: http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Klassifikationen/GueterWirtschaftkl assifikationen/klassifikationwz2008__erl,property=file.pdf;
Download am: 25.11.2011
- [N.N.09a] N.N. „ADAC Pannenstatistik 2008“, 2009,
URL: http://www.adac.de/_mmm/pdf/Pannenstatistik_2008_33402.pdf
Download am: 04.03.2012
- [N.N.09b] N.N. „3D-Simulation: Spritzgieß-Prozesse besser verstehen und optimieren“, K-Impulse, Kunststoff Institut Lüdenscheid, Nr. 47, 2009, S. 7
- [N.N.10a] N.N. „Bauteiloptimierung Hand in Hand“, Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, Nr. 3, 2010, S. 44
- [N.N.10b] N.N. „Arbeitskosten International“, Gesamtmetall - Die Arbeitgeberverbände für Metall- und Elektro-Industrie, 2010,
URL: [http://www.gesamtmetall.de/gesamtmetall/meonline.nsf/id/Grafiken/\\$FILE/ArbeitskostenWelt.pdf](http://www.gesamtmetall.de/gesamtmetall/meonline.nsf/id/Grafiken/$FILE/ArbeitskostenWelt.pdf),
Download am 12.09.2011
- [NSS11] Niechoj, T.
Stein, U.
Stephan, S.
Zwiener, R. „Deutsche Arbeitskosten und Lohnstückkosten im europäischen Vergleich - Auswirkungen der Krise“, IMK Report, Nr. 60, Institut für Makroökonomie und Konjunkturforschung, Düsseldorf, 2011,
URL: http://www.boeckler.de/pdf/p_imk_report_60_2011.pdf,
Download am 12.09.2011
- [NRM08] Nendel, K.
Risch, T.
Michael, M. „Zweidimensionale Bewegungsformen bei Vibrationsförderern“, 4. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik, Technische Universität Chemnitz, 2008

- [NW03] Nyhuis, P.
Wiendahl, H.-P. „Logistische Kennlinien - Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen“, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2003
- [Ort04] Ortner, G. E. „Unternehmensführung und Personalvermögen“, Studententext vom Hagener Institut für Managementstudien e.V., Hagen, 2004
- [OT06] Ortner, G. E.
Thielmann-Holzmayr, C. „Quantitative Aspekte der Personalwirtschaft: Personaleinsatz und Personalcontrolling“, Studententext vom Hagener Institut für Managementstudien e.V., Hagen, 2006
- [Pal11] Palm, S. „Hybridteile am laufenden Band“, Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, Nr. 7, 2011, S. 26-28
- [PBS05] Peters, S.
Brühl, R.
Stelling, J. N. „Betriebswirtschaftslehre“, 12. Auflage, Oldenbourg Wissensverlag, München, 2005
- [Pie08] Pieper, F. „Am Anfang war die Idee“, Qualität und Zuverlässigkeit, Carl Hanser Verlag, München, Nr. 4, 2008, S. 168-169
- [PSK10] Plötner, O.
Sieben, B.
Kummer, T.-F. „Kosten und Erlösrechnung“, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2010
- [RC06] Rees, H.
Catoen, B. „Selecting Injection Molds - Weighing Costs versus Productivity“, Hanser Gardner Publications, Cincinnati, 2006
- [Ree02] Rees, H. „Mold Engineering“, 2. Auflage, Hanser Gardner Publications, Cincinnati, 2002
- [Rei08] Reitz, A. „Lean TPM - in 12 Schritten zum schlanken Managementsystem“, mi-Fachverlag, München, 2008
- [Rez10] Reznicek, T. „Spritzgießen am laufenden Band“, Automatisierung, Alexander Verlag, Hollabrunn, Nr. 6, 2010, S. 20-23
- [Ric09] Rickards, R. C. „Leistungssteuerung kompakt“, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2009
- [RS03] Rother, M.
Shook, J. „Learning to see - value-stream mapping to create value and eliminate muda“, Lean Enterprise Institute, Cambridge, 2003

- [RW11] Redlich, T.
Wulfsberg, J. P. „Wertschöpfung in der Bottom-up-Ökonomie“, Springer Verlag, Heidelberg, 2011
- [SB06] Schüssler, J.
Buske, C. „Atmosphärisches In-Line-Plasma in der Medizintechnik“, Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, Nr. 8, 2006, S. 72-74
- [SBR09] Stransky, R.
Bernnat, A.
Reinfrank, K.-M.
Völkel, M. „Immer mehr Strom – und Kunststoff“, Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, Nr. 9, 2009, S. 82-86
- [Sch99] Schneider, B. „Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile“, Herbert Utz Verlag, München, 1999
- [Sch06] Schneider, W. „Kosten- und Leistungsrechnung“, Universitätsverlag Konstanz, Konstanz, 2006
- [Sch07a] Schiffler, R. „Cleverer Kombination“, blechnet, vogel business media GmbH, Würzburg, Nr. 4, 2007, S. 22-27
- [Sch07b] Schäfer, E. „In der ersten Liga“, Bänder Bleche Rohre, Verlagshaus Gilching, Gilching, Nr. 2, 2007, S. 12-15
- [Sch08] Schmidt, A. „Kostenrechnung - Grundlagen der Vollkosten-, Deckungsbeitrags- und Plankostenrechnung sowie des Kostenmanagements“, 5. Auflage, Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 2008
- [Sch10a] Schmidt, R. „Anspruchsvolle Hybridbauteile durch Kompetenz und Hightech-Fertigung“, blechnet, vogel business media GmbH, Würzburg, Nr. 5, 2010, S. 68-71
- [Sch10b] Schenk, M. „Instandhaltung technischer Systeme - Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs“, Springer Verlag, Heidelberg, 2010
- [Sch10c] Schulz, R. „Wertstromanalyse“, Schulungsunterlage der IPE GmbH, Bietigheim-Bissingen,
URL: http://www.ipe-gmbh.de/fileadmin/PDF/Schulungsunterlage_Wertstrom_10-10-01.pdf,
Download am 08.09.2011

- [SCJ09] Slack, N.
Chambers, S.
Johnston, R.
Betts, A. „Operations and Process Management - Principles and Practice for Strategic Impact“, 2. Auflage, Pearson Education, 2009
- [Sei11] Seitz, A. „Preisindizes zur Errechnung von Wiederbeschaffungswerten 2011“, Zentralverband für Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, Frankfurt am Main, 2011
- [SFH07] Seghezzi, D.
Fahrni, F.
Herrmann, F. „Integriertes Qualitätsmanagement - Der St. Galler Ansatz“, 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2007
- [SG04] Steiner, G.
Gerndorf, R. „Kunststoff-Metall-Hybride mit integrierter Dämpfung - Gemeinsam macht stark“, Plastverarbeiter 55, Hüthing GmbH, Heidelberg, Nr. 3, 2004, S. 46-48
- [Shi92] Shirose, K. „TPM for Workshop Leaders“, Productivity Press, Portland, 1992
- [SHT08] Seidel, W.
Hahn, F.
Thoden, B. „Werkstofftechnik - Werkstoffe, Eigenschaften, Prüfung, Anwendung“, 7. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2008,
- [Som08] Sommer, S. „Taschenbuch automatisierte Montage- und Prüfsysteme“, Carl Hanser Verlag, München, 2008
- [Spe07] Specht, D. „Strategische Bedeutung der Produktion“, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2007
- [Spi10] Spinnarke, S. „Hybridtechnik auf dem Vormarsch“, Produktion, Verlag moderne Industrie GmbH, Landsberg/Lech, Nr. 29-30, 2010
- [SK04] Stitz, S.
Keller, W. „Spritzgießtechnik - Verarbeitung - Maschine - Peripherie“, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2004
- [ST09] Sunderland, N. J.
Thorne, W. F. „Enhanced resin for metal insert molding application“, Society of Plastics Engineers, ANTEC 2009
- [Sta10] Stadler, M. „Wertstromdesign – Ein Leitfaden für die praktische Anwendung“, Diplomica Verlag, Hamburg, 2010

- [Sta11] Stark, J. „Product lifecycle Management - 21st century paradigm for product realisation“, 2. Auflage, Springer Verlag, London, 2011
- [Ste05] Steinhorst, U. „Entwicklung eines Instrumentariums zur Gestaltung von Systempartnerschaften im Produktionsprozess“, 1. Auflage, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2005
- [Ste08] Steinbichler, G. „Methoden und Verfahren zur Optimierung der Bauteilentwicklung für die Spritzgießfertigung“, Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, 2007
- [Ste10] Steger, J. „Kosten- und Leistungsrechnung“, 5. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2010
- [Sys06] Syska, A. „Produktionsmanagement - Das A-Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute“, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2006
- [Tie05] Tietze, J. „Einführung in die angewandte Wirtschaftsmathematik“, 12. Auflage, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2005
- [Tra10] Traintinger, I. „Spritzgießen am laufenden Band“, SPS-Magazin, Technik- und Dokumentationsverlag, Marburg, Nr. 10, 2010, S. 50-53
- [VDI02] VDI-Richtlinie 3423 „Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen“, VDI-Richtlinie 3423, Düsseldorf, 2002
- [Vos11] Vostrovský, R. „FMEA-Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse: Praktische Erfahrungen und Hinweise“, Revision 2, Q-Systems, 2011, URL: http://www.q-systems.cz/files/RVErF_FMEA.pdf, Download am 29.08.2011
- [VWB09] Vajna, S.
Weber, C.
Bley, H.
Zeman, K. „CAx für Ingenieure - Eine praxisbezogene Einführung“, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2009
- [WH08] Wintermantel, E.
Ha, S.-W. „Medizintechnik - Life Science Engineering“, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2008
- [Wie08] Wiendahl, H.-P. „Betriebsorganisation für Ingenieure“, 6. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2008

- [Wil07] Wilde, J. „Systemintegration: Validierung und Verifikation Mechatronikintegration“, Vorlesungsskript, 2007, Universität Freiburg
- [Wöl08] Wöltje, J. „Schnelleinstieg Rechnungswesen“, Rudolf Haufe Verlag, München, 2008
- [Wor96] Wortberg, J. „Qualitätssicherung in der Kunststoffverarbeitung: Rohstoff-, Prozess- und Produktqualität“, Carl Hanser Verlag, München, 1996
- [Zol06] Zollondz, H.-D. „Grundlagen Qualitätsmanagement“, 2. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2006
- [Zum04] Zumkeller, M. A. „Kosteneffiziente Kreislaufführung von Kunststoffen - dargestellt am Beispiel der stofflichen Verwertung von Kunststoffbauteilen aus Altfahrzeugen“, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, Dissertation der Universität Karlsruhe, 2004

Betreute Abschlussarbeiten (nicht öffentlich zugänglich)

- [Dua10] Duarte, R. R. „Anwendung von Simulationsverfahren bei der Herstellung von Kunststoff-Metall-Composits“, Bachelorthesis, Hochschule Esslingen, 2010
- [Kso09] Ksoll, D. „Qualitätsrelevante Einflussfaktoren im verketteten Stanz-Spritzgießprozess für Kunststoff-Metall-Bauteile“, Diplomarbeit, Hochschule Mannheim, 2009
- [Rie08] Riedl, S. „Vergleichende Gegenüberstellung von Produktionssystemen zur Herstellung von Kunststoff-Metall-Bauteilen“, Diplomarbeit, Hochschule Mannheim, 2008

12 Curriculum Vitae

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.